



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil

2009

**André Gonçalo  
Bernardes Santos**

**Bases Granulares de Agregados Reciclados**



**André Gonçalo  
Bernardes Santos**

## **Bases Granulares de Agregados Reciclad**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho A. R. C. A. da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha esposa e família

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa**  
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutora Rosa Paula da Conceição Luzia**  
Professora Adjunta do Instituto Politécnico de Castelo Branco

**Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta**  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro.

## **agradecimentos**

A realização deste trabalho resultou de muito esforço e dedicação, contando com o contributo fundamental daqueles a quem quero deixar os meus agradecimentos.

Ao Professor Doutor Agostinho Benta, por aceitar este desafio e pela sua orientação e apoio ao longo deste trabalho, em especial nos trabalhos experimentais.

Ao Sr. Raul Barros, técnico do laboratório do Departamento de Engenharia Civil, pela sua disponibilidade e apoio na realização dos trabalhos experimentais.

Ao Eng. Paulo Martins, da empresa Manuel Vieira Bacalhau, Lda, central de agregados e misturas betuminosas, pela disponibilização dos agregados de granulometria extensa.

Ao Eng. João Simões, da Mota-Engil, pela disponibilização do material fresado da obra sob a sua direcção.

Aos meus amigos e colegas de curso que directamente ou indirectamente me ajudaram ao longo deste trabalho.

Aos meus pais e irmão, pelo apoio, incentivo e confiança que sempre depositaram em mim.

À minha mulher, por toda a dedicação e apoio, fundamentais, para a realização desta dissertação.

A todos, muito obrigado

**palavras-chave**

Pavimentos rodoviários, camadas granulares, misturas betuminosas, reciclagem de pavimentos, material fresado, agregados, ligantes.

**resumo**

O sector da construção civil incluindo a manutenção dos pavimentos rodoviários consome enormes quantidades de agregados anualmente. A utilização de materiais reciclados contribui para a diminuição da demanda de exploração destes recursos naturais.

Seguindo esta perspectiva, o objectivo principal do presente trabalho foi avaliar a aplicação de agregados obtidos pela reciclagem de pavimentos betuminosos degradados para a construção de camadas de base de novos pavimentos em obras de reabilitação rodoviária.

Este trabalho também faz referência à constituição e comportamento dos vários tipos de pavimentos, dando ênfase aos pavimentos rodoviários flexíveis, tal como às suas principais formas de degradação. Descrevem-se, também, as técnicas de reciclagem mais usuais.

Na parte experimental, descrevem-se os trabalhos laboratoriais realizados para a caracterização dos materiais e para o estudo das misturas recicladas, avaliando o seu comportamento.

No final, apresentam-se as principais conclusões e perspectivas futuras.

**keywords**

Road pavements, granular layers, bituminous mixtures, pavement recycling, milling equipment, aggregates, binders.

**abstract**

The civil construction including the roads pavements maintenance consumes large amounts of aggregates annually. The utilization of recycled materials contributes for reducing natural resources extraction demand.

Following this perspective, the aim of the present work was to evaluate the aggregates implementation obtained by bituminous pavement recycling for new pavement base layers construction in rehabilitation roads works.

This work also refers the several pavements types, constitution and behavior giving emphasis to flexible road pavements as well as their main degradation forms. The recycling techniques are also described.

Laboratorial tests are described for the materials characterization and for the study of mixed recycled mixtures, in order to assess their behavior.

Main conclusions and future prospects are also presented.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	iii
ÍNDICE DE QUADROS .....	vii
ABREVIATURAS .....	ix
SIMBOLOGIA.....	xi
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJECTIVOS .....	3
1.3. CONTEÚDO .....	3
<b>2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS .....	7
2.2.1. <i>Constituição e Comportamento</i> .....	7
2.2.2. <i>Dimensionamento de Pavimentos</i> .....	10
2.2.3. <i>Degradações dos Pavimentos</i> .....	11
2.3. PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS .....	16
2.4. PAVIMENTOS RÍGIDOS .....	18
2.5. FUNDAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	20
<b>3. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS .....</b>	<b>23</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	23
3.2. TÉCNICAS DE RECICLAGEM A QUENTE.....	27
3.2.1. <i>Reciclagem a Quente em Central</i> .....	27
3.2.2. <i>Reciclagem a Quente in situ</i> .....	29
3.3. TÉCNICA DE RECICLAGEM SEMI-QUENTE.....	31
3.4. TÉCNICAS DE RECICLAGEM A FRIO .....	33
3.4.1. <i>Reciclagem a frio com emulsão betuminosa</i> .....	34
3.4.2. <i>Reciclagem a frio com betume-espuma</i> .....	36
3.4.3. <i>Reciclagem a Frio in situ com Cimento.</i> .....	39
<b>4. TRABALHO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>43</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	43
4.2. MATERIAIS CONSIDERADOS .....	43



<b>4.3.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....</b>	<b>44</b>
4.3.1.	<i>Análise Granulométrica.....</i>	44
4.3.2.	<i>Equivalente de Areia.....</i>	48
4.3.3.	<i>Ensaio de Absorção de Azul-de-Metileno.....</i>	48
4.3.4.	<i>Teor em Betume do Material Fresado.....</i>	49
4.3.5.	<i>Proctor Modificado.....</i>	50
<b>4.4.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS MATERIAIS E MISTURAS COM CIMENTO.....</b>	<b>53</b>
4.4.1.	<i>Ensaio CBR (California Bearing Ratio).....</i>	53
4.4.2.	<i>Ensaio à Compressão Simples e Diametral.....</i>	54
<b>4.5.</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
<b>5.</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS .....</b>	<b>67</b>
5.1.	<b>ESTRUTURA DE PAVIMENTO CONVENCIONAL.....</b>	67
5.2.	<b>ESTRUTURA DE PAVIMENTO UTILIZANDO FC EM LEITO DE PAVIMENTO .....</b>	72
5.3.	<b>ANÁLISE COMPARATIVA DAS ESTRUTURAS.....</b>	76
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>79</b>
6.1.	<b>CONCLUSÕES.....</b>	79
6.2.	<b>PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	80
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Pavimento Rodoviário: constituição e acções (adaptado de Branco <i>et al</i> , 2005).....	6
Figura 2.2 - Transferência de carga através da estrutura do pavimento (Wirtgen, 2008) .....	6
Figura 2.3 - Pavimento flexível: constituição e comportamento (adaptado de Branco <i>et al</i> , 2005).....	7
Figura 2.4 - Distribuição das tensões num pavimento flexível.....	8
Figura 2.5- a) Ondulação; b) Rodeiras de raio pequeno (Alves, 2007).....	13
Figura 2.6 - a) Fendas longitudinais b) Pele de crocodilo.....	14
Figura 2.7 - a)“Ninhos” ou covas b) Peladas (Alves, 2007).....	15
Figura 2.8 - a) Exsudação b) Subida de finos (Alves, 2007).....	15
Figura 2.9 - Pavimento semi-rígido: constituição e comportamento (adaptado de Branco <i>et al</i> , 2005).....	16
Figura 2.10 - Constituição e comportamento de um pavimento rígido (adaptado de Branco <i>et al</i> , 2005).....	19
Figura 2.11 - Distribuição das tensões num pavimento rígido.....	19
Figura 3.1 – Esquema do processo de reciclagem a quente em central (Baptista, 2006).....	28
Figura 3.2 – Esquema da reciclagem a quente <i>in situ</i> (adaptado de Wirtgen, 2003).....	30
Figura 3.3 – Processo de reciclagem a quente <i>in situ</i> com central móvel (David, 2006).....	31
Figura 3.4 – Esquema do processo de reciclagem semi-quente em central (Baptista, 2006).....	32
Figura 3.5 – Esquema de produção de mistura reciclada a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa (adaptado de Baptista, 2006).....	34
Figura 3.6 – Fases da reciclagem a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa (adaptado de Baptista, 2006).....	35

Figura 3.7 – Esquema do processo de reciclagem em central com emulsão betuminosa (Baptista, 2006).....	36
Figura 3.8 – Esquema da obtenção do betume-espuma (Baptista, 2006).....	36
Figura 3.9 – Esquema da produção de mistura reciclada a frio <i>in situ</i> com betume-espuma (adaptado de Baptista, 2006).....	37
Figura 3.10 – Fases da reciclagem a frio <i>in situ</i> com betume-espuma (adaptado de Baptista, 2006).....	37
Figura 3.11 – Esquema da reciclagem a frio em central com betume-espuma (Baptista, 2006).....	38
Figura 3.12 – Fases da reciclagem a frio <i>in situ</i> com cimento em calda (adaptado de Baptista, 2006).....	41
Figura 4.1 – Aspecto dos materiais estudados: tout-venant e material fresado.....	44
Figura 4.2 - Aspecto da série de peneiros.....	44
Figura 4.3 - Curva granulométrica do ABGE.....	45
Figura 4.4 - Comparação da curva do ABGE com os limites do CEEP.....	46
Figura 4.5 - Curva granulométrica do material fresado.....	47
Figura 4.6 - Comparação das curvas granulométricas do ABGE e Material Fresado.....	47
Figura 4.7 - Aspecto do ensaio de Equivalente de Areia.....	48
Figura 4.8 - Aspecto do ensaio do Azul-de-Metileno.....	49
Figura 4.9 – Aspecto do sistema de extracção do betume.....	49
Figura 4.10 - Curva granulométrica do material fresado após extracção do betume.....	50
Figura 4.11 - Ensaio Proctor (compactação por apiloamento).....	51
Figura 4.12 - Curva Proctor do ABGE.....	51
Figura 4.13 - Curva Proctor do Fresado.....	52
Figura 4.14 - Comparação das Curvas Proctor.....	52
Figura 4.15 - Aspecto do ensaio CBR (imersão e ensaio de penetração).....	53
Figura 4.16 – Evolução dos valores de CBR em função da % de cimento.....	54

Figura 4.17 - Martelo vibrador usado na compactação dos provetos.....	55
Figura 4.18 – Aspecto dos provetos após compactação e cura.....	55
Figura 4.19 - Ensaio à compressão simples (esquerda) e ensaio à compressão diametral (direita) do AGECE.....	56
Figura 4.20 – Ensaio à compressão simples (esquerda) e ensaio à compressão diametral (direita) do FC.....	56
Figura 4.21 – Variação da resistência à compressão simples do AGECE com a variação do teor em cimento.....	57
Figura 4.22 – Variação da resistência à compressão diametral do AGECE com a variação do teor em cimento.....	57
Figura 4.23 – Variação da resistência à compressão diametral do FC com a variação do teor em cimento.....	58
Figura 4.24 – Variação da resistência à compressão diametral do FC com a variação do teor em cimento.....	59
Figura 4.25 – Comparação dos resultados à compressão simples do AGECE com recurso à CA com os resultados já obtidos com recurso à CMV.....	60
Figura 4.26 - Comparação dos resultados à compressão diametral do AGECE com recurso à CA com os resultados já obtidos com recurso à CMV.....	61
Figura 4.27 - Comparação dos resultados à compressão simples do FC com recurso à CA com os resultados já obtidos com recurso à CMV.....	62
Figura 4.28 - Comparação dos resultados à compressão diametral do FC com recurso à CA com os resultados já obtidos com recurso à CMV.....	62
Figura 5.1 – Estrutura de pavimento flexível convencional obtida no pré-dimensionamento.....	70
Figura 5.2 – Estrutura de pavimento flexível obtido no dimensionamento.....	71
Figura 5.3 – Estrutura obtida do dimensionamento com incorporação de solo-cimento em leito de pavimento.....	73
Figura 5.4 – Estrutura de pavimento final obtida no dimensionamento com FC.....	76
Figura 5.5 – Comparação das estruturas de pavimentos obtidos.....	77

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Famílias e tipos de degradações em pavimentos flexíveis (Branco <i>et al</i> , 2005).....	12
Quadro 3.1 - Principais técnicas de reciclagem.....	26
Quadro 4.1 - Resultados da análise granulométrica ao ABGE.....	45
Quadro 4.2 - Resultados da análise granulométrica do material fresado.....	46
Quadro 4.3 - Valores de CBR para o material fresado sem e com cimento.....	54
Quadro 4.4 – Resultados da resistência à compressão simples e diametral do AGECE.....	57
Quadro 4.5 – Resultados à compressão simples e diametral do FC .....	58
Quadro 4.6 – Resultados da compressão simples e diametral para o AGECE aos 7 dias com compactação por apiloamento.....	60
Quadro 4.7 - Resultados da compressão simples e diametral para o FC aos 7 dias (CA).....	61
Quadro 5.1 - Características do betume a utilizar nas camadas de misturas betuminosas.....	68
Quadro 5.2 - Características das misturas betuminosas a utilizar (agregados e betume).....	68
Quadro 5.3 – Espessuras e módulos de deformabilidade das camadas do pavimento....	72
Quadro 5.4 – Valores de $E$ , $R_{cd}$ e $\sigma_{t,adm}$ das misturas FC.....	74
Quadro 5.5 – Danos e tensões de tracção calculadas no dimensionamento com FC.....	75
Quadro 5.6 - Danos e tensões de tracção calculadas no novo dimensionamento com FC.....	75

## ABREVIATURAS

**AASHTO** – *American Association of State Highways Officials*

**ABGE** – Agregado Britado de Granulometria Extensa

**AGEC** – Agregado de Granulometria Extensa tratado com Cimento

**ASTM** – *Amercian Society for Testing and Materials*

**BD** – Betão betuminoso em camada de desgaste

**BC** – Betão de Cimento

**BG** – Base Granular

**BGE** – Base de Granulometria Extensa

**BMB** – Betume Modificado com Borracha

**BP** – Betão Pobre

**CA** – Compactação por apliloamento

**CBR** – *California Bearing Ratio*

**CEEP** – Caderno de Encargos-tipo das Estradas de Portugal

**CEN** – *European Committee for Standardization*

**CMV** – Compactação com martelo vibrador

**CR** – Compactação relativa

**EAPA** – *European Asphalt Pavement Association*

**EN** – Norma Europeia

**EM** – Estrada Municipal

**EP** – Estradas de Portugal

**FC** – Fresado com cimento

**JAÉ** – Junta Autónoma das Estradas

**LNEC** – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**LP** – Leito de Pavimento

**MACOPAV** – Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

**MB** – Macadame Betuminoso

**MBD** – Mistura Betuminosa Densa

**NP** – Norma Portuguesa

**PRN 85** – Plano Rodoviário Nacional de 1985

**SAMI** – *Stress Absorbing Membrane Interlayer*

## **SIMBOLOGIA**

### **Latino**

B – Percentagem de betume

D – Dano da estrutura do pavimento

E – Módulo de deformabilidade (símbolo genérico)

$E_m$  – Módulo de deformabilidade de mistura betuminosa

$E_{mb}$  – Módulo de deformabilidade do macadame betuminoso

$E_{bd}$  – Módulo de deformabilidade da camada betuminosa de desgaste

$E_{sb}$  – Módulo de deformabilidade da sub-base granular

$E_b$  – Módulo de deformabilidade da base granular

$E_{sf}$ ,  $E_f$  – Módulo de deformabilidade do solo de fundação

EA – Valor de equivalente de areia

h – Espessura da camada de pavimento

$h_g$  – Espessura da camada granular

IP – Índice de penetração do betume

N – Número de eixos padrão

$N_{adm}$  – Número admissível de passagens do eixo padrão

$N_{80}$  – Número acumulado de eixos padrão de 80 kN

n – Porosidade

MB – Valor de azul de metileno

P – Carga do rodado

p – Pressão

Pen25 – Penetração a 25°C de um betume asfáltico

$R_{cd}$  – Resistência à compressão diametral

t – Tempo de carregamento

T – temperatura dos materiais

$T_{ab}$  – Temperatura de amolecimento do ensaio anel e bola

$T_b$  – Teor em betume

$T_s$  – Temperatura de serviço

$V_a$  – Cociente do volume de agregado pelo volume total

$V_b$  – Cociente do volume de betume pelo volume total

w – Teor em água

## **Grego**

$\varepsilon$  – Extensão (símbolo genérico)

$\varepsilon_t$  – Extensão de tracção

$\varepsilon_z$  – Extensão de compressão

$\varepsilon_{zp}$  – Extensão por deformação permanente

$\varepsilon_{rt}$  – Extensão por fadiga

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$\gamma_a$  – Peso específico do agregado

$\gamma_b$  – Peso específico do betume

$\gamma_d$  – Baridade seca

$\tau$  – Força tangencial

$\sigma$  – Tensão (símbolo genérico)

$\sigma_t$  – Tensão de tracção

$\sigma_z, \sigma_c$  – Tensão de compressão

$\sigma_{t,adm}$  – Tensão de tracção admissível



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

As infra-estruturas de transporte de pessoas e mercadorias, são na sua maioria constituídas por estradas, sendo essenciais para o desenvolvimento socio-económico de qualquer país, principalmente o transporte de mercadorias, têm grande influência na economia, pois influenciam o custo final dos produtos.

O pavimento rodoviário é a infra-estrutura mais importante numa via, sendo aquela que está sujeita às acções mais severas do tráfego e do clima. O seu dimensionamento é realizado tendo em conta estas solicitações, geralmente para um período de vida entre 20 a 40 anos, de modo a garantir boas condições de circulação, segurança e conforto. Por estes motivos, uma estrada acarreta elevados investimentos de construção, conservação e reabilitação.

Segundo, Pereira *et al* (2007), “... a estrada deve ser considerada uma infra-estrutura através da qual é possível, com fiabilidade, circular com conforto e segurança e com impactos ambientais cada vez menores, contribuindo activamente para o aumento da qualidade de vida”

Um pavimento deve apresentar dois tipos de qualidades: a qualidade funcional e a qualidade estrutural. A primeira está relacionada com o conforto e segurança de circulação dos utentes e a segunda está relacionada com a capacidade de suporte do pavimento de modo a não sofrer alterações que ultrapassem valores limites, colocando em causa a qualidade de funcionamento (Branco *et al*, 2005).

Uma vez construído um pavimento para um determinado período de vida, numa perspectiva de sustentabilidade técnico-económica-ambiental, uma vez definidos determinados padrões de qualidade, estrutural e funcional, devem ser minimizadas todas as intervenções na sua infra-estrutura, de modo a reduzir ao mínimo os custos com a manutenção da sua qualidade por parte da administração e minimizar os custos para os utentes e para o ambiente (Pereira *et al*, 2007).

É frequente, os pavimentos necessitarem de intervenções de conservação ou reabilitação, não previstas, ainda antes de atingirem o final do período de vida para o qual foram dimensionados, com custos significativos para a respectiva administração rodoviária e para os utentes (Moreira, 2005).

A rede rodoviária nacional é constituída por um elevado número de estradas nacionais construídas até aos anos 80 (antes do plano rodoviário de 1985) e que foram sendo melhoradas ao longo dos anos para fazer face ao crescimento do volume de tráfego utente da rede. Neste grupo de estradas, é frequente verificar-se que a estrutura original do pavimento apresenta um elevado estado de degradação e sem capacidade de suporte ao tráfego pesado actual. Os melhoramentos que foram sendo feitos para adaptar o pavimento à evolução das exigências de tráfego, traduziam-se, e traduzem-se ainda, na aplicação de novas camadas betuminosas quando o pavimento atinge um estado de degradação elevado. Verificando-se a existência de estradas, em que a estrutura actual apresenta uma espessura que mais que duplicada em relação à estrutura inicial (Benta *et al*, 2008).

*Por outro lado, a grande extensão e a deficiente qualidade da rede rodoviária nacional, constituíram, durante muitos anos, um factor desfavorável ao desenvolvimento sócio - económico de Portugal, tendo a implementação do Plano Rodoviário Nacional de 1985 (PRN 85) contribuído em grande medida para o desenvolvimento observado em Portugal desde a adesão à União Europeia (Baptista, 2006).*

Actualmente, as concessionárias das estradas, responsáveis pela conservação destas, depararam-se com vários problemas, como carência de recursos financeiros, carência de recursos naturais, custos energéticos elevados, insuficientes recursos humanos com preparação adequada, etc. Como consequência, tornou-se necessário otimizar os recursos disponíveis. O importante na conservação dos pavimentos é a renovação superficial e a reabilitação estrutural.

*A reciclagem de pavimentos assume um papel preponderante no contexto do desenvolvimento sustentável. Como os recursos são escassos, torna-se imperativo utilizar novas técnicas que permitam que se preservem as jazidas existentes, encorajando a reciclagem e a reutilização dos materiais já extraídos (Moreira, 2005).*

O sucesso dos pavimentos rodoviários depende muito do desempenho estrutural da sua camada de base, pois é esta que assegura, em grande parte, a capacidade de carga para suportar o tráfego previsto. Neste trabalho testa-se a aplicação de material reciclado obtido a partir da fresagem de camadas betuminosas degradadas em camadas de base e/ou sub-bases de novos pavimentos.

## **1.2. Objectivos**

Pretende-se estudar a aplicação de agregados obtidos pela reciclagem de pavimentos betuminosos degradados para a construção de camadas de base ou sub-base de novos pavimentos em obras de reabilitação rodoviária.

No presente trabalho, é estudada a mistura de material fresado com cimento, como solução para a substituição do material granular convencional, procedendo à sua caracterização física e mecânica.

Como material de referência, é estudado o comportamento de um agregado de granulometria extensa (ABGE), tal como a contribuição da adição de cimento, de forma a comparar uma base com material convencional com bases constituídas pelas misturas estudadas.

## **1.3. Conteúdo**

O trabalho está organizado em seis capítulos, cuja organização e conteúdo se resumem nesta secção.

No primeiro capítulo introdutório, faz-se um enquadramento do tema em estudo, definem-se os objectivos e descreve-se a organização do trabalho.

No segundo capítulo descrevem-se os tipos de pavimentos rodoviários, dando maior ênfase aos pavimentos flexíveis, referindo a sua constituição, comportamento e mecanismos de ruína e degradações mais comuns.

No terceiro capítulo abordam-se as técnicas de reciclagem de pavimentos, dividindo-as em dois grupos principais, a reciclagem a quente e a reciclagem a frio, que se divide depois em função do local de realização e tipo de ligante utilizado. Contudo, dá-se maior ênfase às reciclagens a frio, que se enquadram mais no estudo em causa.

No capítulo quatro é dedicado ao estudo laboratorial, incluído a caracterização física e mecânica dos materiais, bem como a caracterização mecânica destes quando misturados com cimento. Descrevem-se os ensaios realizados e os resultados obtidos.

No capítulo cinco ensaia-se o dimensionamento de um pavimento com a incorporação do material fresado com cimento, comparando com um pavimento flexível convencional, dimensionado com os materiais usuais em camadas granulares.

Finalmente, no capítulo seis, apresentam-se as principais conclusões e apontam-se os caminhos para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

### 2.1. Introdução

Os tipos de pavimentos existentes diferem entre si essencialmente pela constituição e comportamento, distinguindo-se três tipos: pavimentos flexíveis, pavimentos rígidos e pavimentos semi-rígidos.

A rede rodoviária portuguesa é constituída, na sua grande maioria, por pavimentos do tipo flexível, por esse motivo este trabalho aborda, principalmente, este tipo de pavimentos, contudo os pavimentos semi-rígidos merecem especial atenção, pelo facto de estarem associados à reciclagem de pavimentos e bases tratadas com ligantes.

Um pavimento é constituído por várias camadas de espessura finita, sistema multi-estratificado, apoiadas na fundação constituída por solo natural, com espessura indefinida (maciço semi-indefinido), podendo existir ou não um leito de pavimento (Branco *et al*, 2005).

As diversas camadas de um pavimento dividem-se em dois grupos principais: camadas ligadas, geralmente aplicadas na parte superior e camadas granulares, aplicadas na parte inferior.

Nas camadas ligadas, utilizam-se materiais de elevada resistência, como as misturas betuminosas ou betão de cimento (pavimentos rígidos), para suportar as tensões elevadas provocadas pela acção do tráfego. Nas camadas granulares, utilizam-se materiais menos resistentes e mais baratos, como materiais granulares inertes, britados ou naturais, que são estabilizadas mecanicamente ou com ligantes hidráulicos, pois nestas camadas a carga dispersa por uma área maior, reduzindo a tensão. A Figura 2.1. representa a constituição esquemática de um pavimento, tal como as principais acções a que está sujeito.

A escolha da constituição de um pavimento novo, definindo o número de camadas e os materiais a adoptar, depende das solicitações às quais o pavimento estará submetido durante o seu período de vida. A solicitação de cada veículo é caracterizada fundamentalmente por uma acção vertical e uma acção tangencial entre o pneu e o pavimento (Minhoto, 2005).

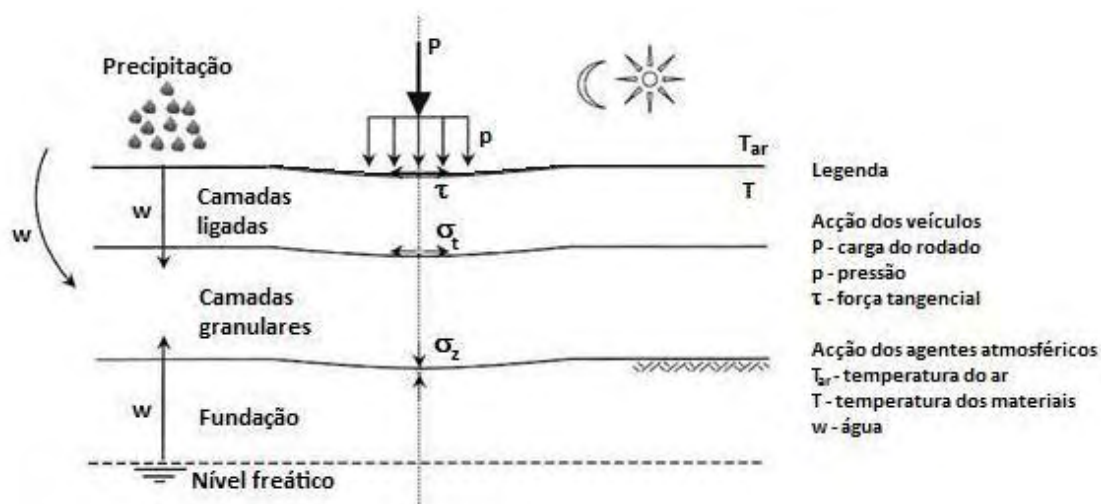


Figura 2.1 - Pavimento Rodoviário: constituição e ações (adaptado de Branco *et al*, 2005)

Em geral os pavimentos desempenham funções estruturais e funcionais. As propriedades resistentes do solo de fundação não são compatíveis com o carregamento resultante das solicitações das cargas dos veículos e das ações climáticas, estas em termos de variações de temperatura (materiais betuminosos) e de teor em água (materiais granulares) (Minhoto, 2005).

A nível estrutural, os pavimentos devem garantir a degradação das cargas do tráfego, reduzindo as tensões verticais a um valor aceitável ao nível da fundação. Sob o ponto de vista funcional, os pavimentos devem garantir comodidade e segurança de circulação do tráfego. Os pavimentos também têm a função de proteger o solo de fundação da água da chuva, permitindo que este mantenha as suas características iniciais ao longo do tempo. A Figura 2.2 ilustra como ocorre a transferência da carga através da estrutura de um pavimento.

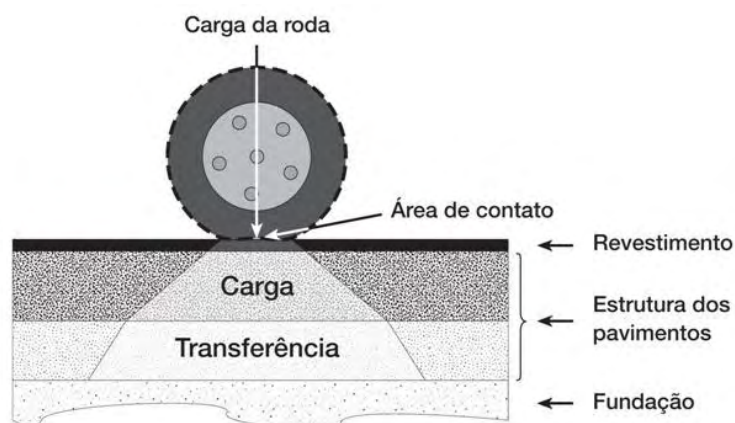


Figura 2.2 - Transferência de carga através da estrutura do pavimento (Wirtgen, 2008)

## 2.2. Pavimentos Flexíveis

### 2.2.1. Constituição e Comportamento

A constituição de um pavimento flexível pode variar muito, em função da intensidade do tráfego, da resistência da fundação e das características dos materiais disponíveis, as quais, por sua vez, dependem das condições climáticas (Branco *et al*, 2005).

Os pavimentos flexíveis (Figura 2.3) são constituídos por camadas de misturas betuminosas e por camadas de material granular. Estas camadas têm maior deformabilidade do que uma laje de betão de um pavimento rígido.

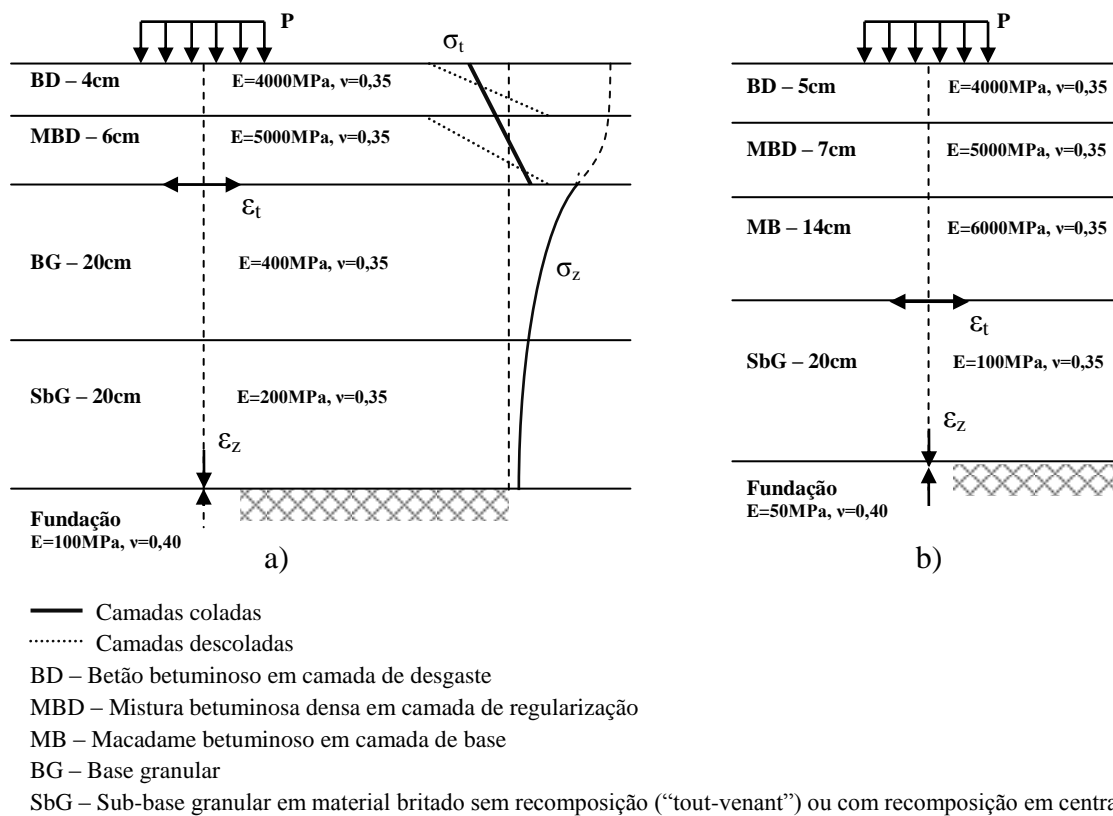


Figura 2.3 - Pavimento flexível: constituição e comportamento (adaptado de Branco *et al*, 2005)

As camadas superiores, constituídas por misturas betuminosas, são as camadas menos espessas do pavimento, apresentando resistência à compressão e à tracção. Estas camadas podem ser divididas em três possíveis camadas: uma camada de desgaste, uma camada de regularização e uma camada de base.

As camadas inferiores são constituídas por materiais granulares, estabilizados mecanicamente, tendo maiores espessuras em relação às camadas superiores e como principal função resistir aos esforços de compressão, não resistindo à tracção, podendo ser formadas por uma camada de base e por uma camada de sub-base. Com esta constituição, as acções transmitidas ao pavimento são atenuadas até níveis de tensão admissíveis para a fundação do pavimento, usualmente executada com solos (Figura 2.4).

A versatilidade da constituição de um pavimento flexível, permite que no seu dimensionamento se defina o número de camadas e materiais a usar em função não só das solicitações do tráfego e do clima, como também em função dos materiais disponíveis na região de implantação, podendo reduzir os custos da obra.



Figura 2.4 - Distribuição das tensões num pavimento flexível

Em seguida faz-se uma breve descrição da constituição de cada camada.

i) Camadas de misturas betuminosas

Independentemente do número de camadas utilizadas, geralmente, a qualidade da mistura evolui de forma decrescente, da camada de desgaste até à camada de base, com variação do agregado e da percentagem de betume.

A camada de desgaste, aquela que fica em contacto directo com as acções exteriores e com o tráfego, é constituída por betão betuminoso, composto por um agregado britado e a per-



centagem de betume varia entre 5 a 6%. A camada base é geralmente constituída por um macadame betuminoso, composto por agregados de maior dimensão, com menor percentagem de betume e maior porosidade que as camadas superiores. Quando é necessário interpõe-se uma camada de regularização, entre a camada de base e a camada de desgaste, utilizando uma mistura betuminosa densa com agregados de dimensão intermédia e geralmente um teor em betume superior a 5%.

#### ii) Camadas de base e sub-base granular

Estas camadas podem ser constituídas por agregados britados a partir da rocha, escórias britadas ou outros materiais não tratados.

As camadas granulares têm como principais funções:

- garantir uma superfície de trabalho estável durante a construção do pavimento;
- protecção da fundação do fenómeno gelo-degelo;
- funciona como camada drenante, protegendo as camadas superiores da presença de água
- elemento estrutural do pavimento.

Em Portugal, o agregado de granulometria extensa, é o material mais utilizado nestas camadas e podem assumir várias granulometrias em função das condicionantes de projecto e da camada a que se destina, se é de base ou de sub-base. Este material é normalmente designado por *tout-venant*. O Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (CEEP), define fusos granulométricos limite para este material e aplicam-se em ambas as camadas.

Existem três factores essenciais, dos quais depende o bom desempenho das camadas granulares:

- contacto entre partículas
- índice de vazios
- teor em água

As camadas de base granular de pavimento, podem ainda ser substituídas por mistura de solos provenientes da terraplanagem estabilizados com um ligante hidráulico (cimento e/ou

cal) que conferem ao solo algum incremento de resistência, denominando-se a mistura por solo-cimento ou solo-cal (Moreira, 2005).

### **2.2.2. Dimensionamento de Pavimentos**

Os principais mecanismos de ruína considerados para o dimensionamento de um pavimento flexível são o fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas, devido às tensões de tracção instaladas na parte inferior destas e a deformação permanente, devido a problemas no solo de fundação.

Segundo Moreira (2005), a lei de fadiga adoptada no dimensionamento pode ser calculada pela equação (2.1)

$$\varepsilon = k \times N^{-\alpha} \quad (2.1)$$

$\varepsilon$  – extensão de tracção ou compressão

$N$  – número de eixos padrão

$k$  e  $\alpha$  - constantes

O dimensionamento de pavimentos flexíveis, apesar dos avanços nesta matéria com o recurso a métodos numéricos, ainda é actualmente realizado apoiado em modelos simplificados de comportamento, nomeadamente no método empírico-mecanicista. Uma das limitações deste método é o facto de considerar que os materiais das camadas têm comportamento elástico linear e isotrópico, o que não corresponde à realidade, já que os materiais constituintes dessas têm um comportamento fortemente não linear (Moreira, 2005).

Os métodos numéricos de elementos finitos, permitem considerar factores que não são contemplados pelos métodos tradicionais, como é o caso da não linearidade e da anisotropia do comportamento dos materiais.

Os métodos expeditos são muito utilizados em Portugal, baseados em procedimentos mais simplificados, ou baseados directamente nos métodos empírico-mecanicistas, que se aplicam à situação portuguesa, como o Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV) ou Manual de dimensionamento da AASHTO. Estes métodos devido às suas limitações são sobretudo utilizados no pré-dimensionamento ou estudos prévios.

*O cálculo da capacidade resistente, em fase de dimensionamento, para camadas executadas com agregados de granulometria extensa, é fortemente dependente das condições da camada subjacente, nomeadamente da camada de fundação (leito de pavimento) geralmente em solos, em que se assume que quanto mais rígido for o suporte desta melhor é a sua resposta em termos de capacidade resistente (Moreira, 2005).*

O módulo de deformabilidade para as camadas de sub-base e base pode ser calculado através da expressão (2.2) proposta por Claessen:

$$E_{sb} = k \cdot E_{sf} \quad (2.2)$$

em que:

$$k = 0,2 \times h_g^{0,45} \quad (2.3)$$

$h_g$  – espessura da camada granular sobre o solo de fundação (mm)

$E_{sf}$  – módulo de deformabilidade (MPa) do solo de fundação, equação (2.4)

### **2.2.3. Degradações dos Pavimentos**

As degradações que ocorrem no pavimento são influenciadas, quer pelas condições climáticas, quer pelas características do tráfego pesado (numero de eixos, carga por eixo, frequência) e pelos materiais e processos construtivos, sendo indispensável dispor de critérios de dimensionamento ajustados aos mecanismos de ruína típicos (Freire, 1994).

As degradações observadas nos pavimentos flexíveis podem ser agrupadas em quatro famílias:

- deformações;
- fendilhamento;
- degradação da camada de desgaste;
- movimento de materiais.

As reparações da camada de desgaste também são consideradas degradações, por melhor que estejam executadas, pois criam descontinuidades no pavimento e tornam-se locais susceptíveis ao surgimento de novas patologias.

O Quadro 2.1. identifica todos os tipos de degradações, que serão descritas em seguida.

Quadro 2.1 - Famílias e tipos de degradações em pavimentos flexíveis (Branco *et al*, 2005)

Famílias de degradações	Tipos de degradações
Deformações	Abatimento { <div>             Transversal             <div>               eixo               <div>berma</div> </div> </div> Longitudinal <div>             Deformações localizadas             <div>Ondulação</div> </div> Rodeiras { <div>             Grande raio (camadas inferiores)             <div>Pequeno raio (camadas superiores)</div> </div>

### a) Deformações

O abatimento é um tipo de deformação que afecta grandes extensões, surgindo ao longo do pavimento, junto à berma ou junto ao eixo da faixa de rodagem, ou na transversal. A acção da água é o principal responsável, pois entra nas camadas granulares, reduzindo a capacidade de carga do pavimento. A água infiltra-se nas bermas ou interface berma-pavimento e através do fendilhamento que surge ao longo ao eixo. Também surgem na transversal, devido a outras situações de degradação ao nível das camadas granulares.

A ondulação (Figura 2.5) é uma deformação transversal que se repete com uma determinada frequência, resultado da má qualidade da mistura betuminosa, onde ocorre arrastamento da mistura por elevada deformação plástica. Por vezes surge uma ondulação suave no pavimento devido à deformação da fundação.



Figura 2.5 - a) Ondulação; b) Rodeiras de raio pequeno (Alves, 2007)

As rodeiras (Figura 2.5.) são as deformações mais expressivas num pavimento, surgem sob forma de depressões longitudinais e podem ser de grande raio, se têm origem nas camadas granulares, ou de pequeno raio, se têm origem nas camadas betuminosas.

### b) Fendilhamento

O fendilhamento dos pavimentos surge por fadiga das camadas betuminosas, devido aos esforços de tracção por flexão, causados pela acção do tráfego ou por perda da capacidade estrutural do pavimento. As fendas podem ainda ter origem em esforços de tracção resultantes das variações térmicas e de temperaturas excessivamente baixas.

As fendas assumem várias formas e têm origens diferentes, podendo ser isoladas, ramificadas, longitudinais (Figura 2.6), transversais e em malha, designado por “pele de crocodilo” (Figura 2.6), que são consequência da evolução e agravamento das outras fendas.

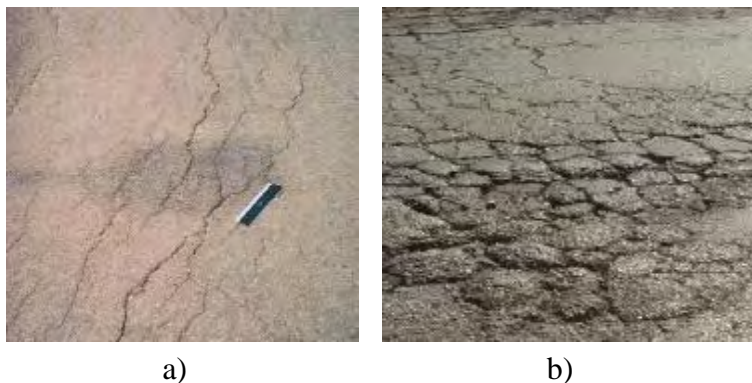


Figura 2.6 - a) Fendas longitudinais b) Pele de crocodilo

#### c) Desagregação da camada de desgaste

Este tipo de degradação surge pela perda da qualidade superficial da camada de desgaste, tendo como causas a incorrecta formulação e fabrico da mistura betuminosa e má execução do pavimento.

Quando há perda da componente mais fina da mistura, ficando uma macrotextura, ou seja, os agregados grossos ficam expostos, dá-se o nome de “cabeça de gato”. A sua evolução origina a desagregação superficial que consiste no desprendimento dos agregados grossos.

As peladas (Figura 2.7) surgem do desprendimento de pequenas placas da camada de desgaste, devido à espessura reduzida da camada e deficiente ligação entre camadas para além das razões acima referidas.

*À medida que os restantes factores começam a interagir com o pavimento, a desagregação da camada de desgaste agrava-se devido à acção conjunta dos outros tipos de patologias que causam o agravamento da qualidade e a diminuição da capacidade de suporte do pavimento (Moreira, 2005).*

O aparecimento de ninhos ou covas (Figura 2.7) está normalmente associado a zonas onde há pele de crocodilo que evoluem e resultam em zonas onde há desprendimento localizado da camada de desgaste.



Figura 2.7 - a) “Ninhos” ou covas b) Peladas (Alves, 2007)

#### d) Movimento de materiais

A exsudação e a subida de finos são os principais tipos de patologias desta família. Estes tipos de degradações estão associados ao movimento de materiais das camadas betuminosas ou granulares.

A exsudação (Figura 2.8) consiste no aparecimento de zonas com concentração excessiva de betume à superfície, devido à migração deste, resultando da deficiente formulação da camada de desgaste, por excesso de betume, ligante de baixa viscosidade ou excesso de finos na mistura, em conjunto com as condições severas do tráfego e as acções climáticas.

A subida de finos (Figura 2.8) ocorre quando as camadas de misturas betuminosas estão fendilhadas, tendo origem nas camadas inferiores com materiais granulares. Devido à presença de água nas camadas granulares ou na fundação e com a passagem de veículos, a compressão exercida provoca a bombagem da água para as camadas superiores, arrastando os finos para a superfície.



Figura 2.8 - a) Exsudação b) Subida de finos (Alves, 2007)

### 2.3. Pavimentos Semi-Rígidos

Os pavimentos semi-rígidos (Figura 2.9) podem posicionar-se, do ponto de vista da constituição e comportamento, entre um pavimento flexível e um pavimento rígido

São constituídos por uma camada de misturas betuminosas, uma camada base em material granular estabilizada com ligante hidráulico (betão pobre), podendo ter uma camada de sub-base com material granular (agregado de granulometria extensa), esta também pode ser aplicada entre as duas primeiras camadas, quando se verifica ser a solução mais eficaz para eliminar a propagação de fendas.

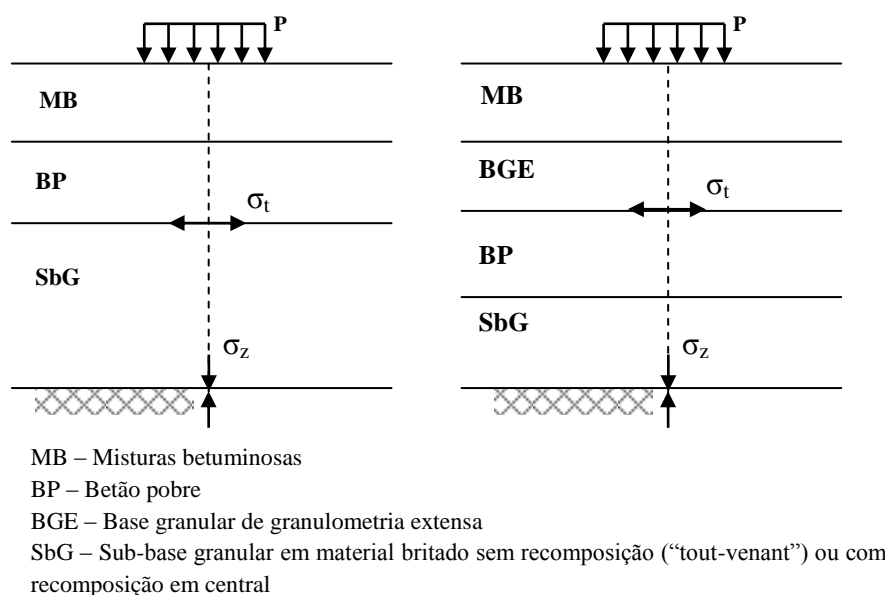


Figura 2.9 - Pavimento semi-rígido: constituição e comportamento (adaptado de Branco *et al*, 2005)

Os materiais obtidos dos pavimentos por fresagem das camadas (betuminosas e/ou granulares), podem ser utilizados, noutros pavimentos ou no próprio (reciclagem *in situ*), em camadas de base e sub-base, em substituição dos materiais convencionais, sendo estabilizados com ligantes hidráulicos ou betuminosos (betume espuma e emulsão betuminosa).

Estes materiais se tiverem características ideais, poderão atingir resistências próximas de um betão pobre, dependendo da quantidade de betão betuminoso e materiais granulares contidas na mistura.



No dimensionamento destes pavimentos utilizam-se leis de fadiga diferentes dos pavimentos flexíveis, pois devido à sua constituição há uma maior distribuição das tensões para as camadas inferiores. O critério de ruída condicionante, é a tensão de tracção máxima na base da camada rígida, constituída por um betão pobre ou solo-cimento, conforme se ilustra na Figura 2.9. Tal como nos pavimentos flexíveis as abordagens de dimensionamento podem ser do tipo empírico-mecanicista ou expedita (MACOPAV).

O MACOPAV propõe a seguinte expressão para a lei de fadiga:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_r} = 1 + a \times \log N_{adm} \quad (2.5)$$

$\sigma_t$  - valor máximo da tensão induzida pelo eixo padrão (MPa);

$\sigma_r$  - resistência à tracção em flexão (MPa);

$a$  - constante que depende da composição e propriedades da mistura, para a qual se admittam valores de -0,06 a -0,1;

$N_{adm}$  - nº admissível de passagens do eixo padrão (130 KN)

Tal como nos pavimentos rígidos, a camada de base tratada com cimento sofre retracção, originando fendas verticais, que se propagam para as camadas betuminosas, levando à sua degradação. Existem várias formas de retardar ou eliminar esse fenómeno, tais como:

- Aplicação de penetração betuminosa;
- Colocação de uma camada em agregado britado de granulometria extensa entre as camadas betuminosas e a base tratada com cimento (pavimento inverso);
- Interposição de uma argamassa betuminosa constituída por um agregado de dimensão máxima de 5mm e por um betume modificado pela adição de um polímero;
- Aplicação de um geotêxtil após a aplicação de uma rega com emulsão betuminosa catiónica rápida;
- Indução ordenada de fissuras na camada de base, com um espaçamento de 5 a 15 metros;

- Aplicação de SAMI-BMB, que é um revestimento superficial em que o ligante utilizado é o betume modificado com borracha reciclada de pneus BMB, com uma espessura efectiva de 1,2 a 1,5 cm, com a função de anti-propagação de fendas.

Existem outras formas de degradação, tal como o fendilhamento por fadiga, degradação com perda de coesão e degradação de interface.

O fendilhamento por fadiga da camada rígida tem origem na acção do tráfego combinada com a acção térmica, levando à degradação das camadas betuminosas, evoluindo até ao estado de pele de crocodilo. Este tipo de fendilhamento não surge durante a maior parte da vida do pavimento, apenas na sua fase final.

A degradação por perda de coesão da camada rígida surge por subdimensionamento, má qualidade da mistura hidráulica, compactação incorrecta, camadas inferiores muito deformáveis e por vezes por perturbação da presa da mistura, devido à abertura antecipada do tráfego. Manifesta-se com o aparecimento de pele de crocodilo, em malha estreita, eventualmente acompanhada de subida de finos.

A degradação de interface da camada betuminosa com a camada hidráulica tem origem essencialmente na deficiente concepção das camadas e da formulação das misturas, que com a acção do tráfego e das condições térmicas levam à degradação das camadas betuminosas sob a forma de pele de crocodilo, fendas e peladas.

## **2.4. Pavimentos Rígidos**

Os pavimentos rígidos (Figura 2.10) têm uma constituição e modo de funcionamento bem diferentes dos pavimentos flexíveis. São constituídos por uma camada em betão de cimento, compactada por vibração, apoiada numa camada de sub-base granular, constituída por agregado britado de granulometria extensa, ou no caso de tráfego intenso, este mesmo material, estabilizado com ligante hidráulico (betão pobre, solo-cimento). A laje de betão desempenha a função de camada de desgaste e de camada de base.

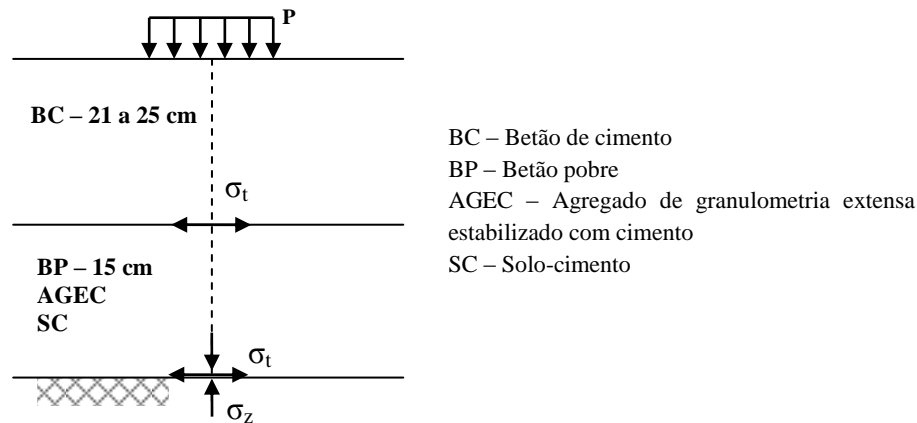


Figura 2.10 - Constituição e comportamento de um pavimento rígido (adaptado de Branco *et al*, 2005)

Este tipo de pavimento é normalmente utilizado quando o tráfego de veículos pesados é elevado, pois devido à sua elevada rigidez e resistência, não sofre deformações plásticas o que permite que não seja necessário uma camada de sub-base de elevada espessura como os pavimentos flexíveis (Moreira, 2005)

A sub-base não tem uma função de suporte, mas de regularização, para garantir boas condições de execução da laje, pois a camada de betão de cimento tem uma levada capacidade de dissipação dos esforços transmitidos, chegando apenas uma pequena fracção à sub-base e deve ser insensível à água. A Figura 2.11 ilustra a distribuição das tensões pelo pavimento.

A fundação deve ser constituída por um material homogéneo, não sensível à água, de modo a não haver descalçamento da laje.

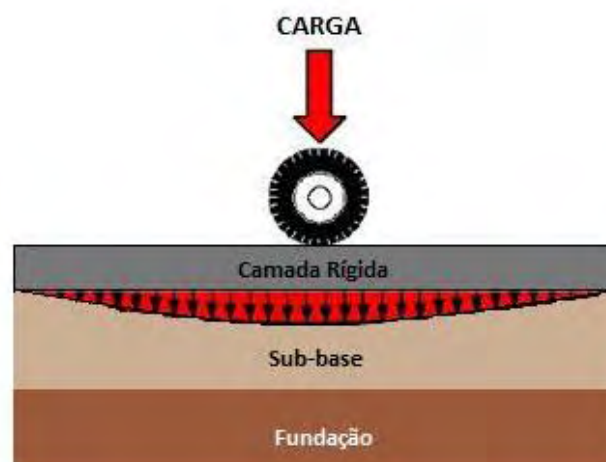


Figura 2.11 - Distribuição das tensões num pavimento rígido

Existem vários tipos, que se distinguem pelo modo como é controlado o fendilhamento por retracção (Branco *et al*, 2005):

- pavimentos de betão não armado, com juntas transversais e longitudinais, com ou sem barras de transferência de carga (passadores);
- pavimentos de betão armado, com juntas, com ou sem passadores;
- pavimentos de betão armado contínuo;
- pavimentos de betão pré-esforçado;
- pavimentos formados por elementos pré-fabricados.

O tipo de pavimento mais utilizado é o de betão vibrado com juntas transversais e longitudinais.

Um dos inconvenientes destes pavimentos é o aparecimento de fendas de retracção do betão. É uma reacção natural do betão, que ocorre durante a presa e endurecimento, desenvolvendo tensões de tracção devido ao atrito da laje com a camada inferior.

## **2.5. Fundação dos Pavimentos**

O solo de fundação é o suporte e a base de toda a super-estrutura a que se dá o nome de pavimento (Eugénio, 2008). É constituída por solos ou rochas, podendo, no caso dos solos, serem estabilizados com ligantes hidráulicos (solo-cimento).

A sua principal função é estrutural, resistindo aos esforços de compressão transmitidos pelo pavimento.

Branco *et al* (2005), considera que a fundação do pavimento tem como funções:

- assegurar uma superfície regular e uma capacidade de suporte, a curto prazo, que permita a construção da primeira camada do pavimento com a espessura e grau de compactação pretendidos;
- assegurar, a longo prazo, a capacidade de suporte necessária para o bom funcionamento estrutural do pavimento;
- permitir, sem degradação, a drenagem da água das chuvas e a circulação do equipamento de obra, antes da construção do pavimento.

Quando a fundação, devido à sua constituição, não permite um suporte adequado, utiliza-se uma camada designada por leito do pavimento, constituída por materiais granulares britados (*tout-venant*) ou por solos e agregados estabilizados com cimento ou cal.

Naturalmente a forma como se constrói depende do tipo de fundação e se está em zona de aterro ou de escavação. As suas funções são caracterizadas, a curto e a longo prazo (Eugénio, 2008):

A curto prazo, ou seja, durante a fase de realização do pavimento:

- nivelamento da plataforma de suporte do pavimento, permitindo efectuar a sub-base respeitando as tolerâncias e espessuras especificadas;
- conferir capacidade de suporte que permita uma compactação correcta e boa regularidade geométrica, tendo em atenção o acaso das condições meteorológicas;
- protecção do solo às intempéries;
- permitir a traficabilidade em boas condições do equipamento de obra;
- eventualmente suportar o tráfego de estaleiro para outras necessidades.

A longo prazo, ou seja, com o pavimento em serviço:

- homogeneização da plataforma de suporte do pavimento, para permitir realizar pavimentos de espessura constante;
- manter apesar das variações do estado hídrico dos solos sensíveis à água uma capacidade de suporte mínima, podendo ser estimada com boa precisão em fase de dimensionamento;
- melhorar a capacidade de suporte da plataforma para otimizar o custo do conjunto leito do pavimento/estrutura do pavimento.
- protecção térmica aos solos sensíveis ao gelo;
- contribuir para a drenagem do pavimento.

O MACOPAV define as classes de fundação (F1 a F4) em função da classe de tráfego, atribuindo um módulo de deformabilidade de cálculo para cada uma. Também define a constituição do leito de pavimento em materiais não ligados e classe de fundação em função da classe de solo de fundação, que depende do valor de CBR. O manual apresenta um

quadro uma relação idêntica para o uso de solos ou agregados tratados com cimento ou cal em leito de pavimento.

O módulo de deformabilidade numa fundação pode ser calculado em função do CBR pela equação (2.6) proposta pela Shell, que vem sendo muito utilizado em Portugal.

$$E_f = 10 \times CBR \quad (2.6)$$

$E_f$  – módulo de deformabilidade (MPa)

CBR – índice CBR (%)

Outra relação, também muito usada é a expressão (2.7), com origem na Grã-Bretanha e que aplica a solos com valores de CBR entre 2% e 12%,

$$E_f = 17,6 \times CBR^{0,64} \quad (2.7)$$

Com  $E$  em MPa e CBR em percentagem.

Os valores de coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) propostos variam entre 0,35 e 0,45, tendo o MACOPAV adoptado o valor de 0,40.

### **3. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS**

#### **3.1. Introdução**

Após a construção de um pavimento, é essencial a sua conservação, para garantir as qualidades funcionais e estruturais ao longo da sua vida útil. As técnicas de conservação e reabilitação podem ser aplicadas a nível funcional (superficial) e/ou estrutural, dependendo do estado do pavimento e da estratégia adoptada pelas administrações responsáveis pelas estradas.

As intervenções de recuperação funcional actuam nas camadas betuminosas e por vezes apenas na camada de desgaste. As soluções mais frequentes são:

- aplicação de uma fina camada de mistura betuminosa a quente sob a superfície existente. Nesta técnica é frequente o recurso a betumes modificados e mais recentemente com adição de borracha de pneu.
- fresar e substituir as camadas betuminosas degradadas por materiais betuminosos novos modificados.
- reciclagem das camadas betuminosas em central ou no local.

A recuperação de pavimentos a nível estrutural, consiste na intervenção nas camadas granulares e/ ou betuminosas. As soluções mais frequentes são:

- reconstrução do pavimento, removendo as camadas degradadas e aplicando novos materiais em novas camadas. Esta solução implica a produção de uma elevada quantidade de resíduos para vazadouro, o que a torna pouco recomendável a nível ambiental e até económico.
- construção de camadas betuminosas adicionais sob a superfície do pavimento. É a solução mais recorrente em Portugal, por ser a mais fácil e económica a curto prazo, pois quando o pavimento existente é incorrectamente avaliado, rapidamente se degrada ou por sub-dimensionamento ou sobre-dimensionamento, pois a aplicação de sucessivas camadas, por vezes espessas, aumenta a carga sobre as camadas granulares.

- Reciclagem profunda que engloba as camadas betuminosas e camadas granulares, obtendo uma camada homogénea estabilizada com ligantes hidráulicos e/ou betuminosos. O processo pode ser realizado em central ou, mais comum, no local.

Segundo Batista (2004), *os critérios adoptados no projecto de construção ou reabilitação de pavimentos rodoviários, que no passado eram de ordem técnica e económica, no presente e no futuro deverão integrar inevitavelmente factores de ordem ambiental.*

Verifica-se, também, uma crescente utilização das técnicas de reciclagem, que pelo que já foi referido, podem ser aplicadas tanto na recuperação funcional como na recuperação estrutural.

*Hoje em dia, uma das estratégias para assegurar um crescimento sustentável de uma sociedade é a reciclagem, a reutilização e a redução dos recursos naturais* (Fonseca, s.d.).

A primeira abordagem à reciclagem de pavimentos surgiu após a 2ª Guerra Mundial, devido à necessidade de recuperar as estradas afectadas, aplicado no Reino Unido, um processo chamado “Retread Process” ou processo de recauchutagem (Jofré, 2003).

Nos EUA a reciclagem de pavimentos rodoviários surge na década de 70, durante a crise petrolífera. O aumento significativo dos preços do petróleo bruto, tal como na actualidade, levou a que as administrações tivessem em conta os custos crescentes do betume asfáltico e dos combustíveis, que influenciam directamente os custos de fabrico, transporte e aplicação das misturas. Na última década, a reciclagem surge em massa, mas por razões ambientais, continuando a decisão de reciclar e como reciclar muito dependente dos factores económicos (Baptista, 2006).

A reciclagem de pavimentos permite a reabilitação dos mesmos e consiste na reutilização dos materiais deles provenientes, onde os materiais constituintes dos mesmos se encontram deteriorados, tendo perdido grande parte das suas propriedades iniciais, ou cujas características se pretende melhorar. (Vieira, 2003).

Esta técnica aplica-se essencialmente na reabilitação de pavimentos flexíveis em estado de ruína com bases granulares, e pavimentos betuminosos num estado último de utilização. Na maioria dos casos, esta técnica mostra-se uma alternativa muito vantajosa em termos financeiros ao reforço convencional ou à reconstrução dos pavimentos (Fonseca, s.d.).



O objectivo principal da reciclagem de um pavimento é recuperar as propriedades originais do material a fresar e, quando necessário, melhorá-las, de modo a obter uma estrutura homogénea e adaptada ao tráfego previsto. Estas propriedades são a capacidade estrutural, a resistência à acção da água e a resistência à fadiga. A reciclagem das camadas betuminosas existentes permite dar uma resposta adequada ao problema de escassez de agregados e à crescente dificuldade de encontrar vazadouros para o material proveniente da fresagem de pavimentos (Vieira, 2003).

A reciclagem de pavimentos consiste em reutilizar os materiais para a construção de novas camadas mediante a desagregação dos mesmos até uma certa profundidade, a adição de um ligante (cimento, emulsão, betume espuma), água (para a hidratação, mistura e compactação), eventualmente novos agregados (como correctores granulométricos) e aditivo, com a dosificação obtida mediante os ensaios efectuados. A mistura homogénea destes materiais espalha-se, compacta-se e cura-se adequadamente, constituindo uma nova camada de pavimento. Esta técnica, ao reaproveitar os materiais existentes, permite ainda que a solução de reabilitação não envolva uma grande modificação na rasante do pavimento, o que faz com que não seja necessário grandes modificações nas serventias da estrada, nos passeios, e resolve parcialmente o problema do “gabarit”, no atravessamento de passagens superiores (Fonseca, s.d.).

Podem ser dadas variadas classificações à reciclagem de acordo com:

- o local onde é executada a mistura;
- a temperatura do processo (a frio ou a quente);
- as características do material a reciclar;
- o tipo do ligante.

O Caderno de Encargos da EP tem em consideração, quatro técnicas de reciclagem:

- mistura reciclada *in situ* com cimento
- mistura reciclada *in situ* com emulsão
- mistura reciclada a quente em central
- mistura reciclada semi-quente em central

Poderão ainda ser adoptados outros métodos, em função da especificidade da obra e equipamentos disponíveis, definidos em projecto ou propostos em fase de obra, devendo neste caso ser objecto de aprovação pela fiscalização (EP, 2009). No Quadro 3.1. estão referidas todas as técnicas de reciclagem actualmente conhecidas.

Quadro 3.1. - Principais técnicas de reciclagem

Tipo de Reciclagem	Local de Mistura	
	<i>In situ</i>	Central
Reciclagem a quente	X	X
Reciclagem semi-quente	----	X
Reciclagem a frio com cimento	X	----
Reciclagem a frio com betume – espuma	X	X
Reciclagem a frio com emulsão betuminosa	X	X

A reciclagem de pavimentos apresenta como vantagens:

- redução do impacto ambiental, pois não há necessidade de recorrer a vazadouros, para depósito dos materiais antigos.
- economia de materiais e de energia (técnica a frio);
- redução da utilização de novos agregados e ligantes betuminosos
- “eliminação das fendas”, impedindo a sua propagação;
- redução do impacto das obras de conservação, para o pavimento e para os utentes;
- manutenção da cota do pavimento existente.

Em qualquer técnica de reciclagem é fundamental a realização de estudos preliminares, em que são contemplados aspectos como a geometria do pavimento, à natureza dos trabalhos de manutenção necessários durante o período de vida do pavimento, a caracterização dos materiais a reciclar, a espessura de intervenção e a formulação da mistura final dos materiais a aplicar no pavimento (Moreira, 2005).

### 3.2. Técnicas de Reciclagem a Quente

Moreira (2005), define a reciclagem a quente de pavimentos como uma técnica que resulta na execução controlada das seguintes fases:

- remoção e desagregação a frio do pavimento existente, de forma controlada, tanto em espessura como em largura;
- aquecimento e mistura, onde é incorporado um ligante novo e agregados virgens, e em caso de necessidade um agente rejuvenescedor, para recuperação das qualidades originais do betume envelhecido;
- reposição da nova mistura, em nova camada de pavimento, utilizando as técnicas convencionais.

A quantidade de ligante e/ou rejuvenescedor a adicionar à mistura depende sempre das características do ligante presente no material fresado. Assim torna-se fundamental a caracterização do betume presente no material a reciclar, recorrendo a ensaios que consistem em obter características como o ponto de amolecimento, viscosidade, ductilidade e penetração, de modo a ser possível realizar uma mistura do betume novo com o antigo, de forma correcta. A mistura final deve respeitar os parâmetros considerados para as misturas novas, sendo necessário fazer a correcção granulométrica com a adição de novos agregados.

#### 3.2.1. Reciclagem a Quente em Central

A técnica de reciclagem a quente em central (Figura 3.1.) consiste na incorporação parcial de misturas betuminosas fresadas provenientes de pavimentos antigos para fabricação de misturas betuminosas a quente.

A reciclagem em central envolve a fresagem, transporte e armazenamento dos materiais existentes no pavimento e posterior transporte para a produção a quente de misturas betuminosas. Podendo ser utilizada como processo de regeneração de pavimentos ou de aproveitamento de materiais fresados e obtidos noutros trechos de estrada. As misturas betuminosas recuperadas podem ser provenientes da desagregação de pavimentos betuminosos por fresagem e/ou demolição (extracção de placas de pavimento posteriormente britadas) ou materiais excedentários da produção de misturas betuminosas.

As centrais de produção a quente de misturas betuminosas encontram-se divididas em centrais contínuas e em centrais descontínuas. Nas centrais contínuas a mistura, secagem e aquecimento dos agregados ocorre no mesmo tambor (tambor secador-misturador), enquanto, que nas centrais descontínuas, o mesmo processo ocorre em diferentes unidades, ou seja, os agregados passam primeiro pelo tambor secador e depois são encaminhados para o misturador.



Figura 3.1 – Esquema do processo de reciclagem a quente em central (Baptista, 2006)

Apesar de existirem diversas formas de fazer reciclagem a quente em central, todas elas têm algo em comum:

- o material fresado de um pavimento é incorporado na mistura betuminosa reciclada;
- a central de reciclagem tem características muito semelhantes às de uma central de betuminoso;
- o material betuminoso antigo é adicionado à mistura em quantidades compreendidas entre 20 e 80% dos novos agregados, ou quase 100% (sem novos agregados);
- a mistura produzida é aplicada num pavimento como uma mistura nova.

*Actualmente, o grande desenvolvimento no campo da tecnologia de centrais betuminosas e no aparecimento de novos tambores misturadores impulsionaram bastante esta técnica e permitem a utilização de maiores percentagens de material a reciclar (Azevedo & Cardoso, 2003).*

Para obter misturas com desempenho e características idênticas ao das misturas fabricadas a quente, são adicionados novos materiais correctivos, agregados e betume. O material recuperado a incorporar no processo de produção deverá ser homogéneo, isento de materiais contaminantes e estar totalmente caracterizado de acordo com os critérios estabelecidos pelo CEEP. Para a obtenção de características de homogeneidade o material deverá ser, quando necessário, objecto de tratamento prévio em central (trituração, crivagem, eliminação de contaminantes...). Se o ligante das misturas recuperadas se encontrar muito envelhecido e se a taxa de incorporação o exigir, poderá ser necessário a adição de agentes rejuvenescedores ou de outro tipo de aditivos, com o objectivo de melhorar as características da mistura final (EP, 2009).

*A reciclagem a quente, sempre que se faça em Central, não apresenta problemas maiores na aplicação em obra que os que podem ocorrer com uma mistura a quente convencional (Dueñas et al, 2008).*

Esta técnica apresenta benefícios de ordem económica e ambiental. Os menores gastos de recursos naturais, neste caso, agregados e betume, permitem a redução de custos, principalmente quando se observa um acentuado aumento do preço do petróleo bruto, tal como a redução da exploração de pedreiras. Outra clara vantagem desta técnica é o facto de permitir uma excelente aplicação dos materiais provenientes da fresagem. Contudo, esta técnica acarreta maiores custos energéticos em comparação à fabricação das misturas betuminosas convencionais, mas estes são compensados com o menor consumo de materiais novos.

*Comparativamente às restantes técnicas identifica-se a vantagem da mistura reciclada apresentar características mecânicas idênticas às das misturas tradicionais, não baixando assim a sua contribuição em termos de resistência (Branco et al., 2005).*

### **3.2.2. Reciclagem a Quente in situ**

Existem duas variantes desta técnica: a termo-reperfilagem e a termo-regeneração.

A termo-reperfilagem, consiste no aquecimento do pavimento seguido da sua compactação, tendo por objectivo selar as fendas existentes e repor a regularidade longitudinal do pavimento. A termo-regeneração consiste no aquecimento das camadas betuminosas, a sua escarificação, recomposição, nivelamento e compactação em nova camada de base, tudo

numa só passagem. Após a reciclagem da camada existente é aplicada uma mistura nova com características de camada de desgaste. A Figura 3.2. ilustra um esquema do processo de reciclagem.

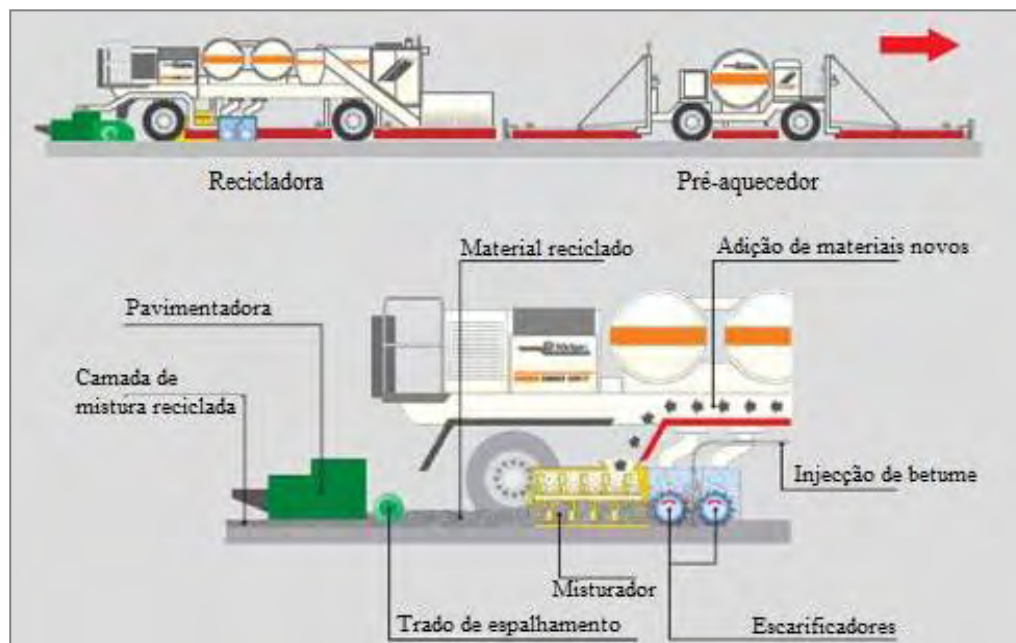


Figura 3.2 – Esquema da reciclagem a quente *in situ* (adaptado de Wirtgen, 2003)

Esta técnica só é aplicável a pavimentos flexíveis sendo mais adequada para solucionar problemas funcionais, ao nível da camada de desgaste. A profundidade de reciclagem não deve exceder 8 cm, pois uma profundidade superior requereria um aquecimento excessivo do pavimento.

Uma das vantagens desta técnica é o facto de o processo ser rápido, reduzindo o tempo de intervenção na estrada e consequentemente a reposição rápida do tráfego. Outra é o facto de permitir um melhor aproveitamento da capacidade aglutinante do betume (Moreira, 2005).

Existem ainda centrais contínuas móveis, que realizam a reciclagem *in situ*, nas quais o tambor secador misturador tradicional, está montado sobre um chassis rolante, complementado por uma pavimentadora (Figura 3.3). A mistura betuminosa existente no pavimento é fresada e colocada numa linha de fabrico, composta por uma tremonha doseadora, onde também são adicionados os agregados novos. À medida que o equipamento se desloca, a baixa velocidade, os materiais fresados são transferidos para o tambor secador misturador

por um tapete elevador. No tambor efectuam-se as operações de aquecimento, de mistura e de adição do betume. A mistura betuminosa pronta é descarregada para outro tapete transportador que a leva para a tremonha da pavimentadora. A fase final do processo envolve as operações tradicionais de pavimentação das camadas superiores. As percentagens de materiais reciclados atingem frequentemente mais de 90% (David, 2006).

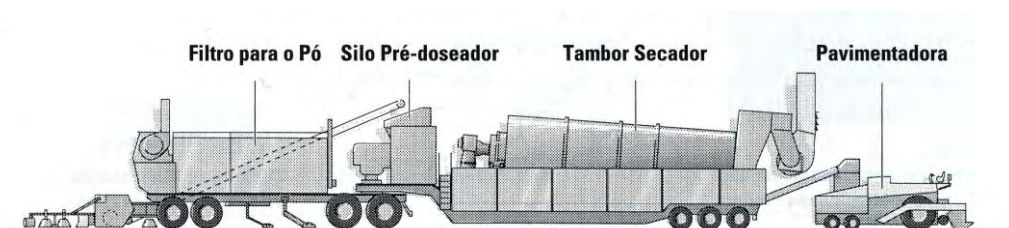


Figura 3.3 – Processo de reciclagem a quente *in situ* com central móvel (David, 2006)

### 3.3. Técnica de Reciclagem Semi-Quente

A reciclagem semi-quente (Figura 3.4) é realizada em central e permite reciclar até 100 % das misturas betuminosas recuperadas (material fresado). Consiste no aquecimento das misturas betuminosas recuperadas a 90°C no tambor de uma central a quente, contínua ou descontínua, para posteriormente serem misturas com uma emulsão betuminosa adequada no misturador da central, no caso das descontínuas, ou no tambor secador misturador, no caso das centrais contínuas. O espalhamento deverá ser efectuado três horas após o fabrico. A mistura pode ser armazenada durante 24 horas sempre que a colocação em obra (espalhamento e compactação) seja efectuada à temperatura de 60°C ou superior. Devido ao aquecimento a que foram submetidas as misturas betuminosas recuperadas não se aplica o tempo de cura associado às misturas a frio, nomeadamente à reciclagem a frio. O aquecimento a que foi submetido o material fresado permite que a abertura ao tráfego seja imediata (EP, 2009; Baptista, 2006; Vieira, 2003).

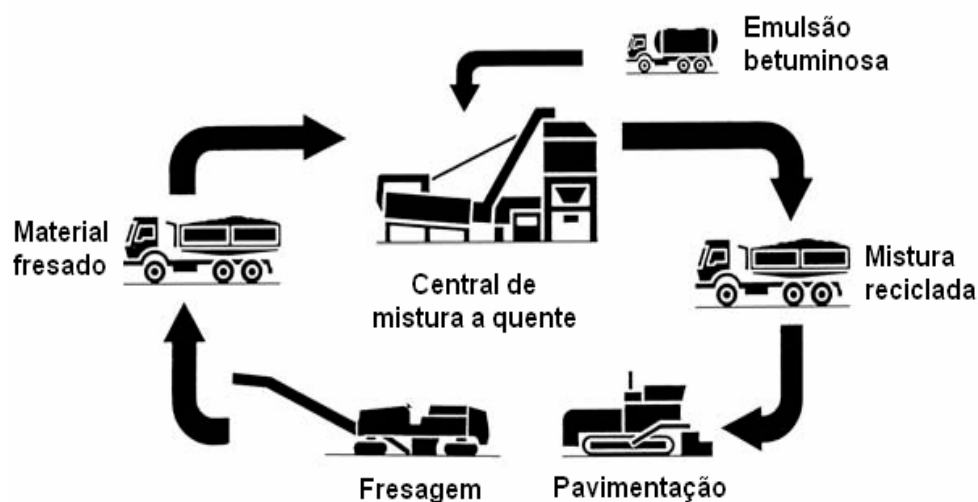


Figura 3.4 – Esquema do processo de reciclagem semi-quente em central (Baptista, 2006)

Esta técnica tem como principais vantagens (Soto & Vieira, 2008):

- permite reciclar 100 % dos resíduos provenientes da fresagem dos pavimentos;
- não necessita de um período de cura, devido à eliminação de grande parte da água durante o processo de fabricação;
- não condicionar o planeamento da obra a uma única época do ano (Verão);
- trabalhar a temperaturas mais baixas que na reciclagem a quente, devido à utilização de emulsões betuminosas, com a consequente economia de energia;
- melhorar o controlo da mistura final, visto ser fabricada em central.

Na reciclagem de misturas betuminosas por este processo, os componentes principais são o material betuminoso recuperado e o ligante betuminoso, podendo admitir-se aditivos retardadores de ruptura, de adesividade ou materiais granulares adicionais para correcção granulométrica. A granulometria do material betuminoso recuperado deve ainda cumprir um dos fusos do CEEP, propostos para as misturas recicladas a frio *in situ*. Deverão ainda ser realizados, em termos de caracterização do ligante recuperado, os seguintes ensaios:

- Ponto de amolecimento anel e bola (°C)
- Solubilidade (%)
- Percentagem de asfaltenos (%)



### 3.4. Técnicas de Reciclagem a Frio

*A reciclagem a frio consiste no reaproveitamento dos materiais constituintes do pavimento, tendo em vista a execução de novas camadas de pavimento, em que não é utilizada a acção do calor durante o processo (Moreira, 2005).*

A reabilitação do pavimento obtém-se à custa da adição de ligantes hidráulicos ou hidrocarbonatos (betume-espuma e emulsão betuminosa) aos materiais de forma a permitir um aumento da resistência da mistura aglutinada. Esta técnica aplica-se sobretudo quando há necessidade de reabilitar estruturalmente pavimentos flexíveis incorporando além das camadas betuminosas as camadas granulares. Estas técnicas implicam sempre a aplicação de novas camadas betuminosas, pois os materiais reciclados são aplicados em camadas de sub-base e/ou base.

As técnicas de reciclagem a frio apresentam claras vantagens a nível económico e ambiental, pelo facto de o processo não exigir elevados consumos energéticos e por permitir um aproveitamento significativo dos materiais dos pavimentos.

As técnicas de reciclagem a frio, além de serem agrupadas consoante o tipo de ligante a incorporar, podem ser subdivididas consoante o local onde se realizam, já que o processo pode ser realizado em central ou *in situ*, esta última mais utilizada e conhecida uma vez que praticamente todo o material reciclado é reaproveitado, apresentando por isso vantagens significativas do ponto de vista ambiental (Moreira, 2005).

Além das vantagens decorrentes da utilização da reciclagem a frio de pavimentos, a reciclagem a frio com emulsões tem, quando comparada com a solução de reciclagem a quente, é a de ser uma técnica, que quando realizada *in situ* consome uma baixa ou mesmo inexistente quantidade de novos inertes. O aproveitamento do suporte existente, bom como o facto de não haver necessidade de transportar o material fresado, a ausência de emissões contaminantes, e os preços finais competitivos, podem ser ainda referidos como pontos fortes da técnica.

### 3.4.1. Reciclagem a frio com emulsão betuminosa

As emulsões são sistemas coloidais, ou seja, dois líquidos imiscíveis, a água e o betume, que coabitam através da dispersão de pequenas gotículas de betume na água, o que é ajudado pela introdução dum sabão ácido ou básico que assegura aquela dispersão (Baptista, 2006).

O uso de emulsão betuminosa apresenta algumas limitações, devido aos elevados custos e a uma maior sensibilidade à acção climática, sendo muito limitado em zonas húmidas, pois para que ocorra a rotura da emulsão, é necessário que o tempo seja seco (Branco *et al*, 2005).

Este tipo de reciclagem pode ser realizada *in situ* e em central.

A o processo de reciclagem *in situ* é semelhante à reciclagem com cimento, variando apenas o ligante que é uma emulsão betuminosa de cura lenta. A Figura 3.5 mostra um esquema da produção da mistura reciclada com emulsão betuminosa.

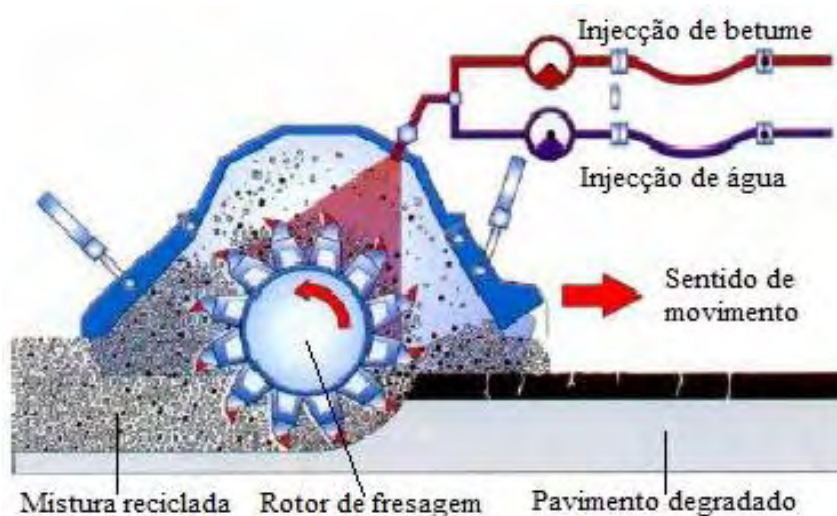


Figura 3.5 – Esquema de produção de mistura reciclada a frio *in situ* com emulsão betuminosa (adaptado de Baptista, 2006)

O processo de reciclagem envolve as fases apresentadas na Figura 3.6 e consiste essencialmente em:

- Fresar o pavimento deteriorado até à profundidade requerida.
- Desagregar o material recuperado.

- Adicionar os diferentes componentes, isto é, emulsão, água de pré-envolvimento, aditivos se requeridos e, em caso necessidade, agregados.
- Misturar o material
- Espalhar o aglomerado.
- Compactação



Figura 3.6 – Fases da reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa (adaptado de Baptista, 2006)

Este tipo de reciclagem aplica-se na recuperação de camadas de desgaste envelhecidas, em que o pavimento tem uma estrutura adequada ao tráfego existente. Assim esta técnica apesar de ser idêntica à reciclagem com cimento, esta não se aplica à reabilitação estrutural do pavimento. O CEEP recomenda a aplicação com espessuras de 6 a 12 cm. Contudo é possível a incorporação de uma pequena percentagem de material proveniente de camadas granulares adjacentes, nesse caso há necessidade de adição de material correctivo, tal como, cal ou cimento. Esta adição é particularmente importante para reduzir a sensibilidade à água da camada reciclada. Nestas situações, por norma as espessuras das camadas a tratar poderão ser ligeiramente superiores, bem como a dosagem de cimento também poderá ser superior, da ordem dos 2%.

O processo de reciclagem em central, consiste na fresagem das camadas do pavimento existente, posteriormente o material é transportado para central onde é misturado com a emulsão betuminosa à temperatura ambiente, seguindo-se o transporte e aplicação na obra de origem ou noutra obra, conforme é ilustrado na Figura 3.7. Tal como a reciclagem *in situ*, existem limitações de ordem meteorológica, que devem ser levadas em conta durante o período de cura (Baptista, 2006).

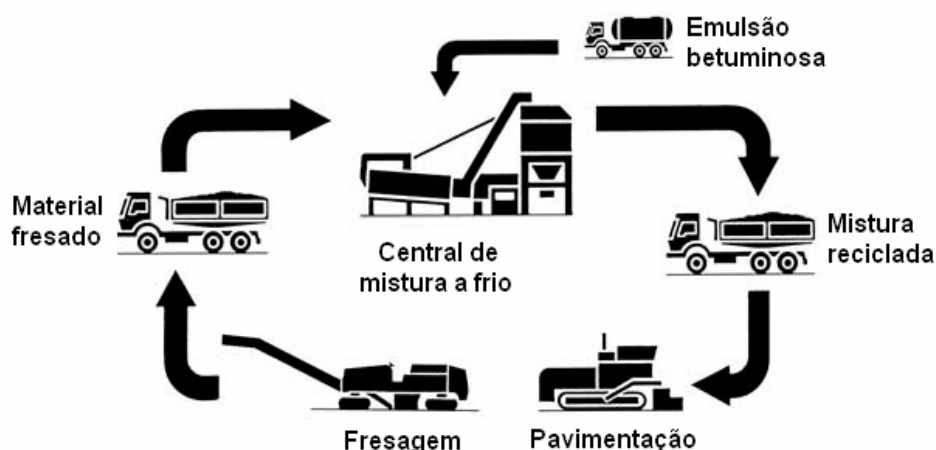


Figura 3.7 – Esquema do processo de reciclagem em central com emulsão betuminosa (Baptista, 2006)

### 3.4.2. Reciclagem a frio com betume-espuma

O betume-espuma, tal como a emulsão betuminosa, é um sistema coloidal em que a fase dispersa é vapor de água, em vez de água, no betume inicialmente aquecido (Figura 3.8). Trata-se de uma técnica bastante recente, que pode ser utilizada não só com materiais betuminosos como melhora a resistência ao corte e a susceptibilidade à água dos materiais granulares reciclados.

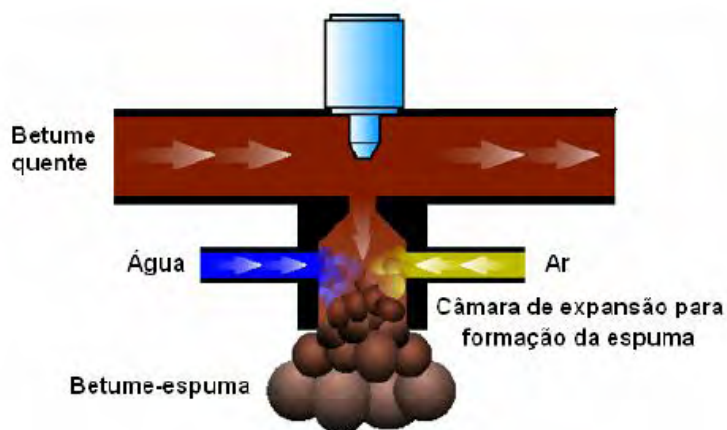


Figura 3.8 – Esquema da obtenção do betume-espuma (Baptista, 2006)

A reciclagem *in situ* com betume espuma, consiste na fresagem e mistura do material reciclado com o ligante, obtendo um pavimento de alta qualidade com excelente comportamento em condições ambientais extremas. Na Figura 3.9 apresenta-se um esquema de produção de mistura reciclada *in situ* com recurso a betume-espuma.

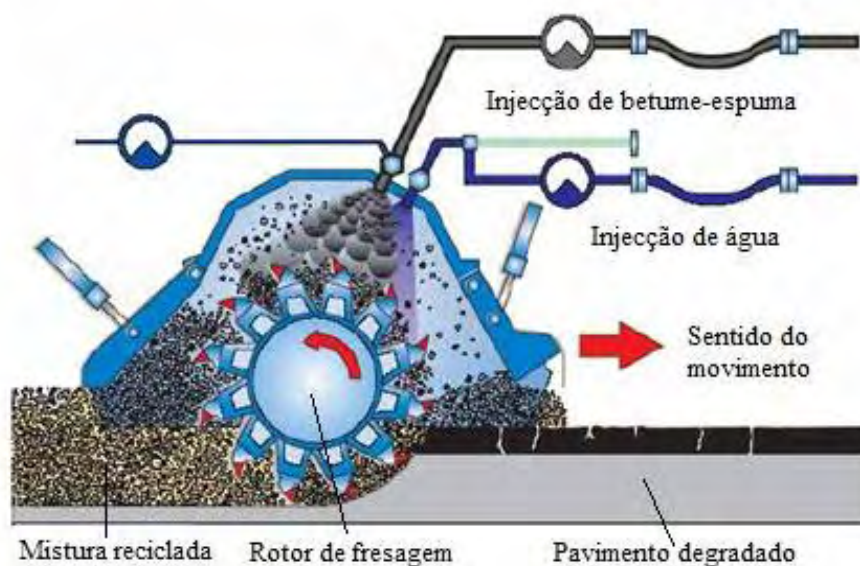


Figura 3.9 – Esquema da produção de mistura reciclada a frio *in situ* com betume-espuma (adaptado de Baptista, 2006)

Esta técnica é provavelmente a mais recente técnica com ligantes betuminosos, com grande aplicação no Brasil, África do Sul, Austrália, América, Médio Oriente e Europa, tratando-se de uma técnica recomendada para a reabilitação de pavimentos flexíveis funcionalmente e estruturalmente muito degradados.

O processo é em tudo semelhante às outras técnicas a frio *in situ*, sendo diferente no ligante utilizado, tal como o processo de obtenção deste. Envolve o acoplamento de um tanque de betume, de um tanque de água e de um compressor ao equipamento de reciclagem, seguem-se posteriormente as operações de nivelamento e compactação da camada, conforme ilustrado na Figura 3.10.

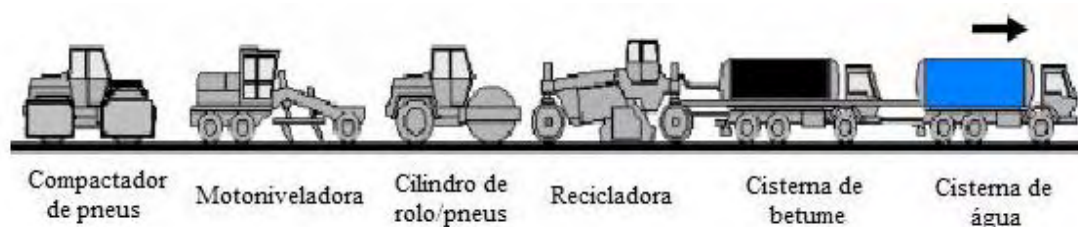


Figura 3.10 – Fases da reciclagem a frio *in situ* com betume-espuma (adaptado de Baptista, 2006)

Tal como na reciclagem a frio com emulsão betuminosa, a reciclagem com betume-espuma pode realizar-se em central. O processo é muito idêntico, apenas difere no tipo de ligante,

realizando-se os mesmos procedimentos que incluem a fresagem do material e transporte deste para a central, onde é misturado com o betume-espuma e posteriormente transportado e aplicado em obra, conforme ilustrado na Figura 3.11.

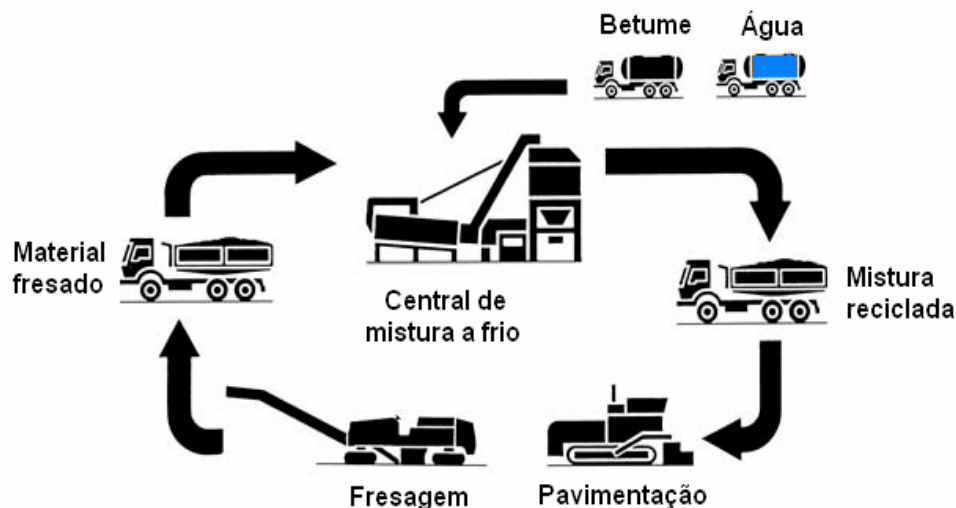


Figura 3.11 – Esquema da reciclagem a frio em central com betume-espuma (Baptista, 2006)

Seixas (2008), considera como principais vantagens da técnica com betume espuma:

- É um tratamento eficaz de pavimentos deteriorados;
- Trata-se de um processo economicamente competitivo de reabilitação de pavimentos, sendo considerada mais económica, quando comparada com a fresagem e reposição de pavimentos betuminosos;
- Produz um pavimento flexível, resistente e durável com um comportamento viscoelástico, resistente às deformações plásticas permanentes e com reduzidas deflexões;
- Apresenta reduzidos custos de manutenção, considerando os custos globais de vida útil;
- É responsável pela redução substancial de volumes de escavação, bem como a necessidade de importação de novos materiais de pavimentação;
- Conserva os recursos naturais de agregados e constitui uma solução de reabilitação de pavimentos ambientalmente responsável;
- Minimiza os impactos na circulação rodoviária em virtude da rapidez e eficiência do seu processo construtivo;

- O pavimento reciclado com espuma de betume permite uma imediata abertura ao tráfego;
- É resistente à humidade e bombagem de finos, devido ao envolvimento dos finos pelo betume, elevada coesão e baixa permeabilidade;
- Não apresenta riscos de fissuração por retracção, devido aos baixos volumes de ligante e água.

### **3.4.3. Reciclagem a Frio *in situ* com Cimento.**

A reciclagem a frio com cimento consiste num processo de rejuvenescimento/reforço de pavimentos com a reutilização parcial ou integral dos materiais constituintes das camadas de misturas betuminosas e materiais granulares, que após submetidos a um processo de fresagem são misturados com cimento, água e eventualmente com aditivos e agregados correctivos.

Especificamente podem-se enumerar os seguintes objectivos do emprego desta técnica (Simões & Paul, 2003):

- transformação de um pavimento degradado e heterogéneo numa estrutura resistente e mais homogénea;
- incremento da capacidade de carga, adaptando-a às solicitações do tráfego
- incremento da durabilidade: menor susceptibilidade à água e maior resistência à erosão;
- protecção do leito de pavimento e das camadas inferiores do pavimento, por vezes com características deficientes

Esta técnica quando utilizada na reabilitação de pavimentos flexíveis degradados com elevada espessura das camadas granulares, pode constituir uma solução económica e com vantagens a nível ambiental. Sendo a rede rodoviária nacional essencialmente constituída por pavimentos deste tipo, pode-se considerar este processo de reciclagem o que mais se adequa ao caso português, tanto pela disponibilidade do cimento em relação aos outros ligantes, pois o cimento é fabricado em praticamente todos os países, e Portugal é um bom exemplo disso, e ainda pelo histórico das características e comportamento do cimento atendendo à sua elevada aplicabilidade na construção.

O estudo destas misturas consiste na definição de um teor em cimento adequado para que no mínimo, se obtenha a resistência para um solo-cimento. A camada reciclada, em condições ótimas, acaba por constituir uma camada do tipo “agregado de granulometria extensa tratado com cimento” (AGEC) e apresenta resistência muito mais alta que a anterior, passando a estrutura final a ser idêntica a um pavimento semi-rígido (Branco *et al.*, 2005). Contudo, a qualidade da mistura depende sempre da quantidade de materiais betuminoso e materiais granulares alcançados pelo equipamento, pois quanto maior é a presença de mistura betuminosa no material reciclado menor será a resistência obtida, devido à reduzida capacidade de aglutinação dos agregados revestidos com betume com o cimento. Portanto é legítimo considerar que a resistência da mistura depende de:

- Percentagem de cimento
- Processo de fresagem ou degradação (granulometria)
- Teor em água
- Baridade máxima da mistura
- Processo de mistura
- Idade do material
- Tipo de materiais a reciclar

A NP EN197/2001 define as classes de cimento utilizadas. Recomenda-se o uso de cimentos de classe de resistência baixos, com de menor calor de hidratação por forma, a minimizar a ocorrência de fendas de retracção. Como tal é usual a utilização de cimentos de classe de resistência 32,5kN, com início de presa superior a duas horas, pois para valores superiores, o controlo de fendas é mais difícil.

O Caderno de Encargos da EP define, para misturas recicladas com cimento, uma dosagem de ligante superior a 3 % e resistência à compressão simples aos 7 dias superior a 2,5 MPa. A compactação mínima prevista em obra é de 97% em relação ao ensaio Proctor modificado. Uma pequena variação na densidade, por exemplo 5%, traduz-se numa grande variação as resistências mecânicas, que pode significar uma redução da ordem dos 25%.

O processo de reciclagem a frio *in situ* com cimento de pavimentos flexíveis, pode ser definido pela sucessão das seguintes fases (Moreira, 2005):



- preparação da superfície e desagregação ou escarificação para permitir o nivelamento adequado, humedificação requerida, arejamento;
- espalhamento dos inertes correctores da granulometria e do cimento
- mistura
- nivelamento
- compactação
- reperfilamento
- cura

Na figura 3.12 apresenta-se um esquema de aplicação desta técnica.

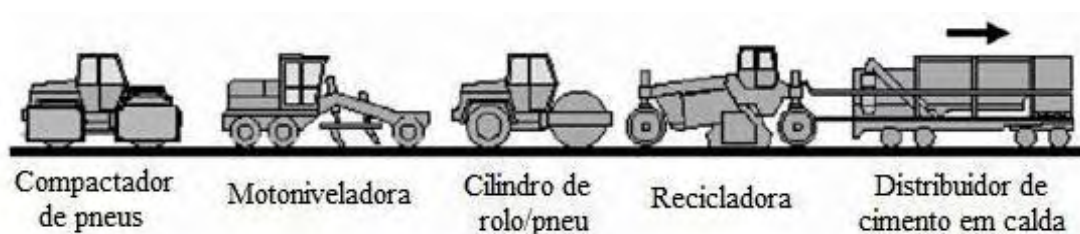


Figura 3.12 – Fases da reciclagem a frio *in situ* com cimento em calda (adaptado de Baptista, 2006)

Um correcto processo de cura é essencial para o comportamento da mistura a longo prazo, recorrendo à aplicação de uma rega de cura com emulsão de rotura rápida, logo após à compactação, de modo a evitar a perda rápida de humidade, permitindo uma cura controlada. Caso seja necessário, pode-se aplicar uma fina camada de gravilha de modo a proteger a camada da acção do tráfego (Moreira, 2005).

Os materiais reciclados com cimento, são misturas com alguma ou até elevada rigidez, que pode levar à fissuração destas camadas devido às tensões com origem nas acções da variação da temperatura e na acção do tráfego, propagando-se para a camada de desgaste, provocando a degradação do pavimento. Esta situação é idêntica ao que acontece com os pavimentos semi-rígidos, podendo-se adoptar algumas das mesmas medidas para a redução ou eliminação da propagação das fendas, recorrendo à aplicação de geotêxtil, de um revestimento superficial com ligante betuminoso modificado com borracha (SAMI), a pré-fissuração da camada reciclada e a aplicação de uma camada betuminosa modificada com borracha na camada de desgaste em vez das misturas convencionais.

No dimensionamento de pavimentos com a aplicação de materiais reciclados com cimento em camadas de base, aplica-se a mesma lei de fadiga que o MACOPAV propõe para os pavimentos semi-rígidos.

## 4. TRABALHO EXPERIMENTAL

### 4.1. Introdução

O material fresado quando estabilizado com cimento, permite a sua aplicação em camadas de sub-base e base, em substituição dos materiais granulares convencionais, conseguindo obter valores de resistência maiores e por conseguinte a redução da espessura das camadas betuminosas.

Com o objectivo de estudar a aplicabilidade deste tipo de mistura, realizaram-se ensaios em laboratório para a caracterização física e estudo do seu comportamento mecânico, segundo as respectivas normas, comparando os resultados com os requisitos definidos pelo CEEP e MACOPAV.

De modo a ter um material de referência, este trabalho contempla a caracterização de um agregado de granulometria extensa, precedendo igualmente ao seu estudo com a adição de cimento. Este tipo de mistura é normalmente utilizado em camadas de sub-base ou base em pavimentos semi-rígidos e rígidos e em camada de regularização no enchimento de bermas.

### 4.2. Materiais Considerados

Neste trabalho experimental, procedeu-se a caracterização de dois materiais distintos (Figura 4.1):

- Um agregado de granulometria extensa (ABGE), correntemente designado por *tout-venant*, de origem calcária, obtido de uma central de Aveiro.
- Material fresado, com origem da obra de beneficiação da EM 255 em Cabeceiras de Basto, foi obtido por fresagem das camadas betuminosas e parte da camada granular, devido a uma correcção da cota da estrada e armazenado em estaleiro.

A quantidade de material granular incorporada no material fresado é bastante inferior à quantidade de material betuminoso. Se o material fresado fosse unicamente obtido das camadas betuminosas, estando o material envolvido por betume, seria conveniente o estudo com a adição de pó de pedra para melhorar a aglutinação do ligante hidráulico. Como

tem algum material granular incorporado, optou-se por proceder ao estudo do material fresado no seu estado original, sem qualquer correcção granulométrica.



Figura 4.1 – Aspecto dos materiais estudados: *tout-venant* e material fresado

### 4.3. Caracterização dos Materiais

#### 4.3.1. Análise Granulométrica

Iniciou-se a caracterização pela análise granulométrica do ABGE e do material fresado, segundo a Especificação LNEC-E233, utilizando peneiros ASTM (Figura 2.2). Obteve-se os resultados apresentados no Quadro 4.1 e Quadro 4.2, dos quais resultaram as curvas granulométricas ilustradas na Figura 4.3 e Figura 4.5.



Figura 4.2 - Aspecto da série de peneiros

Quadro 4.1. Resultados da análise granulométrica ao ABGE

Peneiros ASTM	Abertura da malha (mm)	Material Passado (%)
1.1/2"	37,5	100,0
1"	25,0	95,0
3/4"	19,0	89,1
1/2"	12,5	79,8
3/8"	9,51	73,0
nº4	4,76	52,9
nº8	2,38	36,0
nº16	1,19	22,3
nº30	0,595	14,3
nº50	0,297	8,6
nº100	0,149	6,2
nº200	0,075	5,0

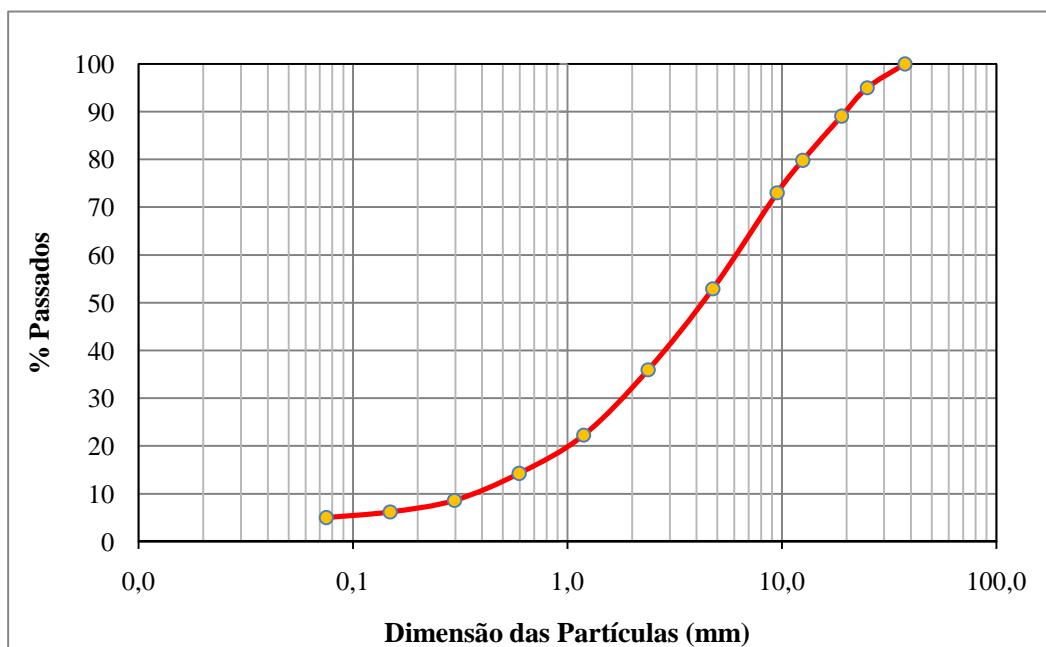


Figura 4.3 - Curva granulométrica do ABGE.

A curva resultante apresenta uma curvatura bastante regular, o que aparentemente, demonstra ser um material homogêneo e uma granulometria típica para este tipo de material.

Comparando a curva com os limites superior e inferior, proposto pelo CEEP, para um ABGE, conforme ilustrado na Figura 4.4, verifica-se que o material é mais fino na parte mais grosseira (acima dos 5 mm) e que o resto da curva se enquadra nos limites. Contudo, considerou-se este material adequado para estudo.

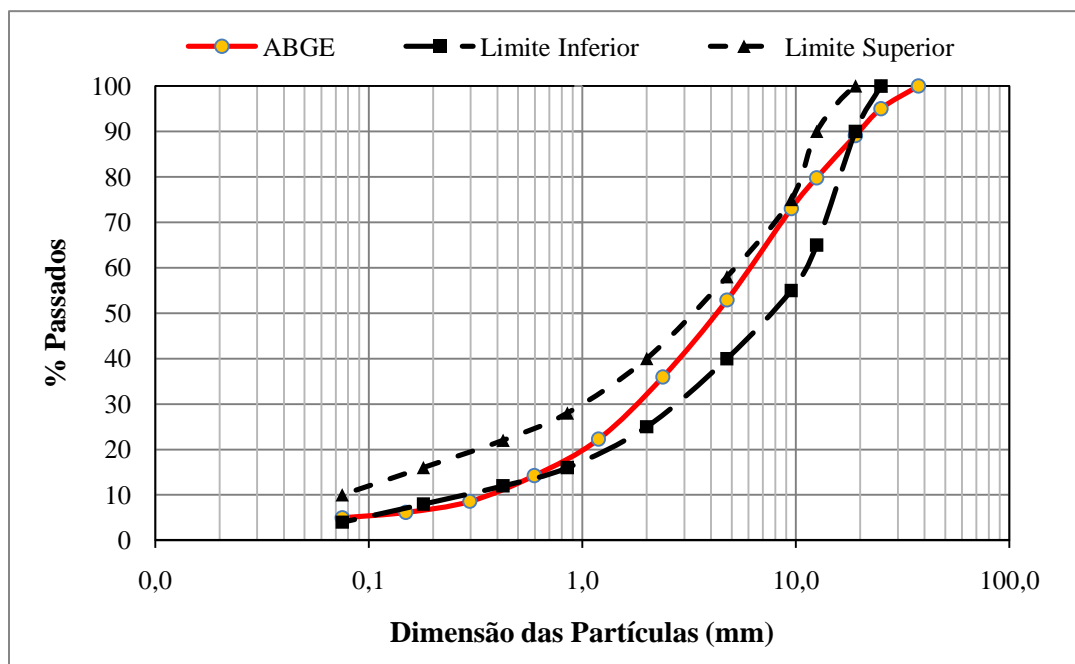


Figura 4.4 - Comparação da curva do ABGE com os limites do CEEP.

Quadro 4.2. Resultados da análise granulométrica do material fresado

Peneiros ASTM	Abertura da malha (mm)	% Acum. Material Passado
1.1/2"	37,5	100,0
1"	25,0	100,0
3/4"	19,0	99,4
1/2"	12,5	92,7
3/8"	9,51	83,9
nº4	4,76	61,7
nº8	2,38	44,1
nº16	1,19	29,3
nº30	0,595	16,9
nº50	0,297	7,4
nº100	0,149	2,9
nº200	0,075	0,9

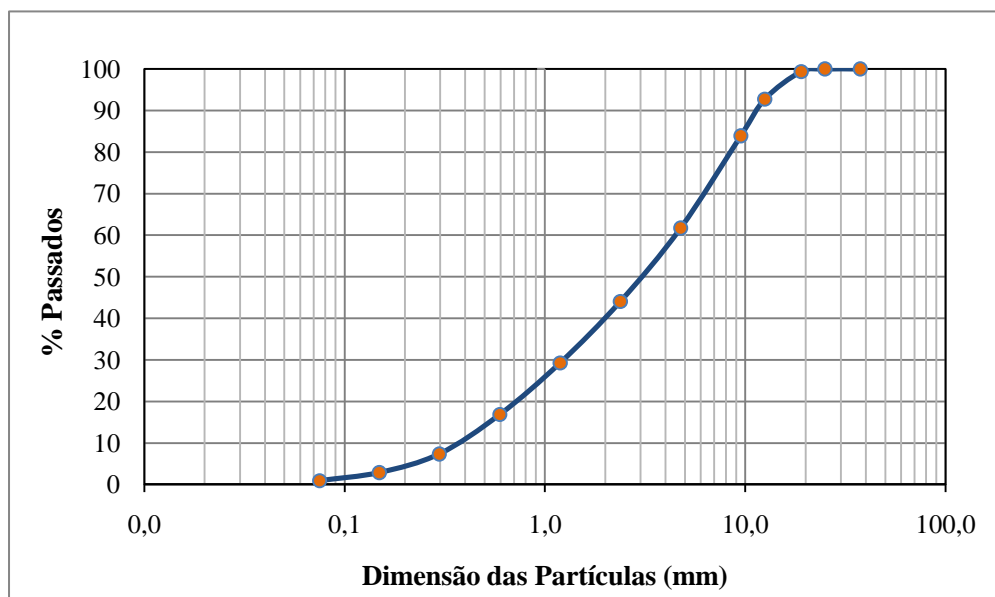


Figura 4.5 - Curva granulométrica do material fresado.

De acordo com a classificação unificada para solos (ASTM D2487-85), o material fresado pode ser caracterizado como uma areia bem graduada (SW).

Comparando a curva do material fresado com a curva do ABGE (Figura 4.6), verifica-se que é mais fina na parte mais grosseira e mais grossa na parte mais fina. Isto deve-se à granulometria inicial das misturas betuminosas, e à própria fresagem que provoca a diminuição da quantidade de agregados de dimensões superiores.

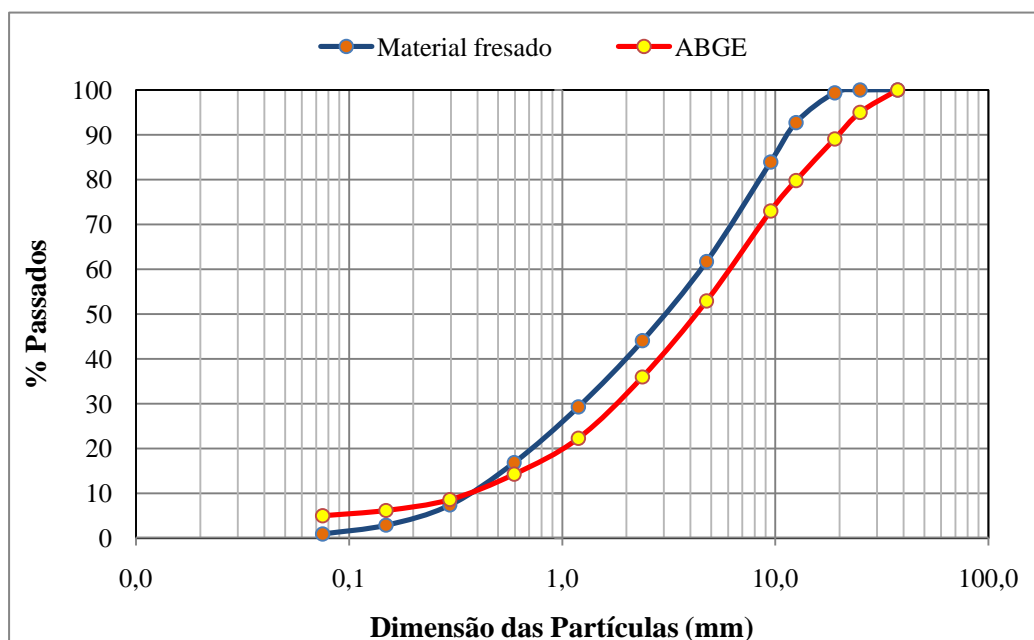


Figura 4.6 - Comparação das curvas granulométricas do ABGE e Material Fresado.

#### 4.3.2. Equivalente de Areia

Realizou-se o ensaio de equivalente de areia, segundo a NP EN 933-8/2002, de modo a avaliar a quantidade de finos presentes no material, ou seja, o seu estado de limpeza. A Figura 4.7 ilustra o ensaio.

Obteve-se o valor de equivalente de areia de  $EA = 53\%$  para o ABGE e de  $EA = 81\%$  para o material fresado.

O CEEP apresenta valores mínimos para agregados britados de granulometria extensa (ABGE), de  $EA = 40\%$  para aplicação em sub-base e  $EA = 50\%$  para aplicação em base, portanto o ABGE é aplicável em ambas as camadas.

Para materiais reciclado não existe valores mínimos definidos, mas com o valor de  $81\%$ , conclui-se que o material tem uma baixa presença de finos. Portanto adoptou-se, como valor mínimo,  $EA = 30\%$ , valor adoptado pelo CEEP para solos.



Figura 4.7 - Aspecto do ensaio de Equivalente de Areia

#### 4.3.3. Ensaio de Absorção de Azul-de-Metileno

O ensaio de azul-de-metileno (Figura 4.8), segundo a NP EN 933-9/2002, tem como objectivo avaliar a quantidade e qualidade da argila presente no material, em que tal como o equivalente de areia permite avaliar a limpeza do material.



Obteve-se para o ABGE o valor de azul-de-metileno de  $MB = 1,4 \text{ g/100 gramas de solo}$ . O CEEP define que os valores devem ser  $MB \leq 2,5$  para sub-base e  $MB \leq 2,0$  para base. Portanto é claro a aplicabilidade deste material em ambas as camadas granulares.

Para o material fresado obteve-se  $MB = 0,5 \text{ g/100g de solo}$ . Sendo um valor baixo é mais adequado comparar com o valor limite para solos seleccionados proposto pelo CEEP, em que  $MB \leq 1,5$ .



Figura 4.8 - Aspecto do ensaio do Azul-de-Metileno.

#### 4.3.4. Teor em Betume do Material Fresado

O teor em betume foi obtido através de um processo de extracção, segundo a norma ASTM D 2172-95 (Método B), ilustrado na Figura 4.9. Este método consiste na dissolução do betume com recurso a um solvente, tricloroetileno, que após aquecimento, este condensa envolvendo toda a amostra. O processo termina quando o líquido que escorre do cone inferior estiver a sair limpo.



Figura 4.9 – Aspecto do sistema de extracção do betume

O teor em betume obtém-se pela seguinte expressão:

$$B(\%) = \frac{P_{mist} - P_{agr}}{P_{agr}} \times 100 \quad (4.1)$$

B – percentagem de betume

$P_{agr}$  – peso dos agregados secos após extracção do betume (g)

$P_{mist}$  – peso da mistura seca (g)

Do ensaio obteve-se uma percentagem de betume (média) de 6,3 %. Procedeu-se à análise granulométrica dos agregados após extracção do betume e obteve-se a curva granulométrica ilustrada na Figura 4.10, da qual se verifica que a mistura contém uma elevada quantidade de finos, o que pode justificar a elevada percentagem de betume.

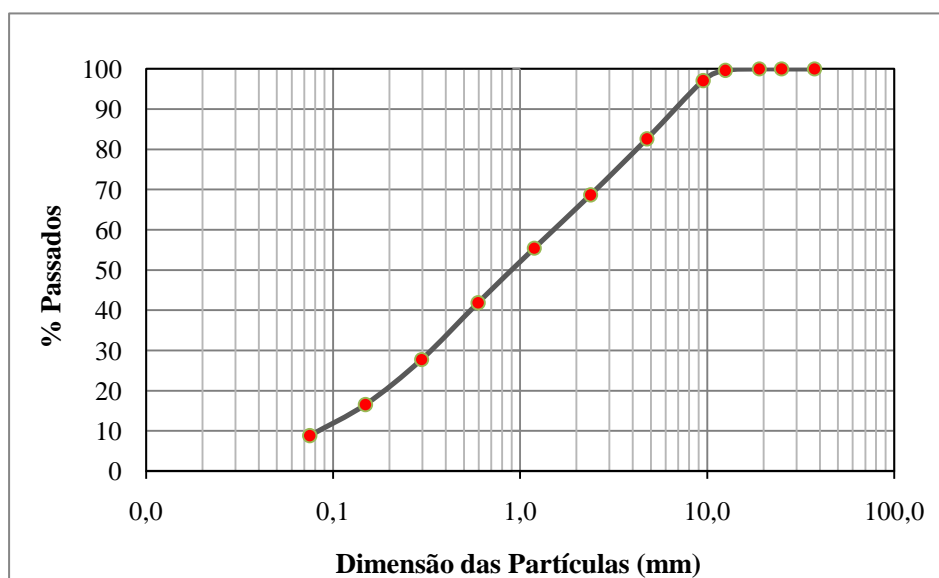


Figura 4.10 - Curva granulométrica do material fresado após extracção do betume

#### 4.3.5. Proctor Modificado

Realizou-se o ensaio Proctor, segundo a especificação LNEC E197/1967, para determinação da baridade máxima e o teor em água óptimo. A Figura 4.11 ilustra a fase de compactação dos provetes.



Figura 4.11 - Ensaio Proctor (compactação por apiloamento)

Dado a granulometria dos dois materiais, utilizou-se molde grande e compactação pesada em 5 camadas, realizando quatro ensaios para cada material, variando o teor em água em 1% de 3% a 6% para o ABGE e de 4% a 7% para o material fresado.

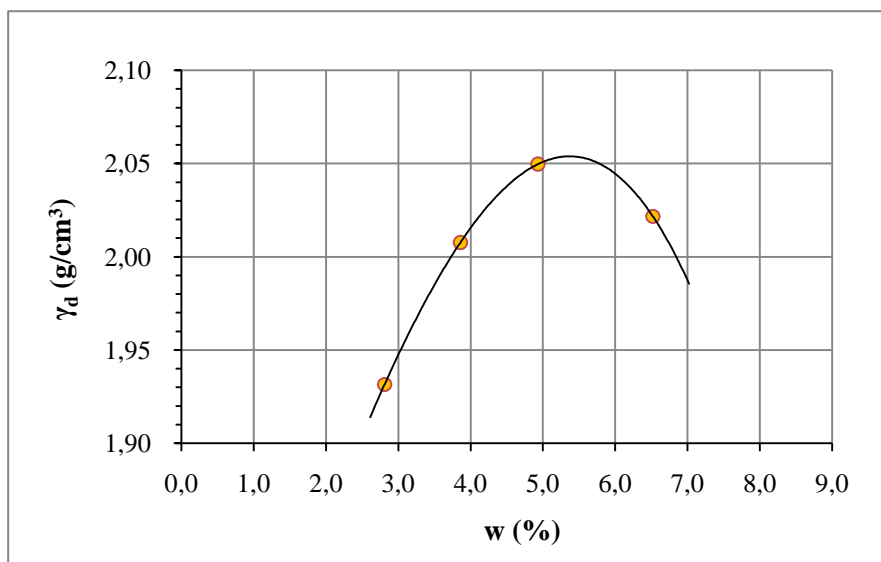


Figura 4.12 - Curva Proctor do ABGE

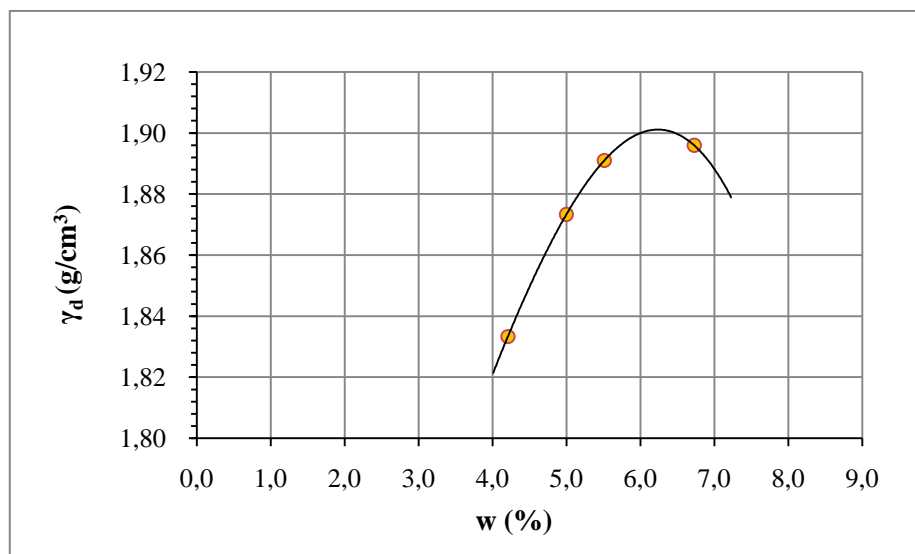


Figura 4.13 - Curva Proctor do Fresado

Pela análise das curvas Proctor do ABGE (Figura 4.11) e do material fresado (Figura 4.13), retira-se uma baridade seca máxima de 2,05 g/cm<sup>3</sup> e 1,90g/cm<sup>3</sup> e um teor de água óptimo de 5,4% e 6,2%, respectivamente.

Comparando as curvas Proctor (Figura 4.14), verifica-se que o ABGE apresenta maior baridade seca que o material fresado e um teor em água óptimo inferior. O aumento do teor em água no material fresado deve-se ao facto deste material apresentar uma massa volúmica menor, ou seja maior índice de vazios e como tal maior capacidade de retenção da água.

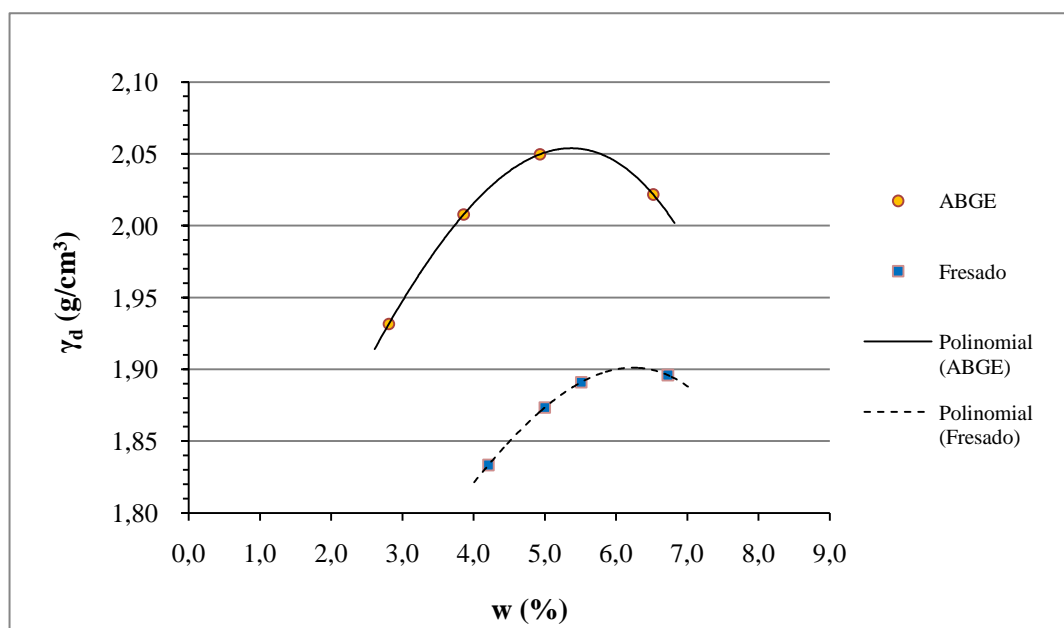


Figura 4.14 - Comparação das Curvas Proctor.

## 4.4. Caracterização Mecânica dos Materiais e Misturas com Cimento

### 4.4.1. Ensaio CBR (California Bearing Ratio)

Realizou-se o ensaio de CBR, segundo a especificação LNEC E-198/1967, para o ABGE e material fresado. Também foi considerado a mistura destes materiais com cimento do tipo CEM II 32,5 kN para os teores de 2%, 4%, 6% e 8%.

Para cada material, executou-se séries de três provetes, com recurso à compactação por apiloamento (igual ao Proctor) e com o teor de água óptimo obtido no Proctor. Em cada série de provetes, procedeu-se à variação da compactação com 12, 25 e 55 pancadas.

Após a preparação e compactação dos provetes, foram imersos em água durante 90 horas, controlando, através de um deflectómetro, a expansão do material. Tanto no ABGE como no material fresado, não se verificaram alterações significativas. Durante a penetração, realizaram-se leituras dos 0 mm aos 10 mm, variando 0,5 mm até aos 3 mm e depois 1 mm até aos 10 mm. A Figura 4.15 ilustra a imersão dos provetes e o sistema de ensaio de CBR.

Os valores utilizados para o cálculo do valor de CBR são as leituras obtidas da penetração aos 2,5 mm e 5 mm, obtendo um gráfico que relaciona estes valores com a compactação relativa obtida para cada provete. Do gráfico retira-se o valor de CBR para 95% de compactação relativa.



Figura 4.15 - Aspecto do ensaio CBR (imersão e ensaio de penetração)

Para o agregado de granulometria extensa com cimento (AGEC) obteve-se um valor de CBR de 60%, valor considerado normal para o material em causa. Quando misturado com 2% de cimento, atingiu o limite do anel (50 KN) antes de atingir ao 10 mm e obteve-se 156%, sendo um valor muito elevado e perde significado para a caracterização do material. Posto isto, não se realizou o ensaio para os restantes teores em cimento.

No ensaio do material fresado obteve-se os valores de CBR apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Valores de CBR para o material fresado sem e com cimento.

% Cimento	0	2	4	6	8
CBR a 95% C. Relativa (%)	7,0	19,3	23,1	33,6	38,4

O valor de 7% para o CBR de material fresado sem cimento, é característico de solos da classe S2 e pela evolução crescente quase linear, conforme ilustrado na Figura 4.16, dos valores CBR a quando o aumento da percentagem de cimento, pode-se concluir que o estudo deste material fresado se aproxima de um estudo solo-cimento.

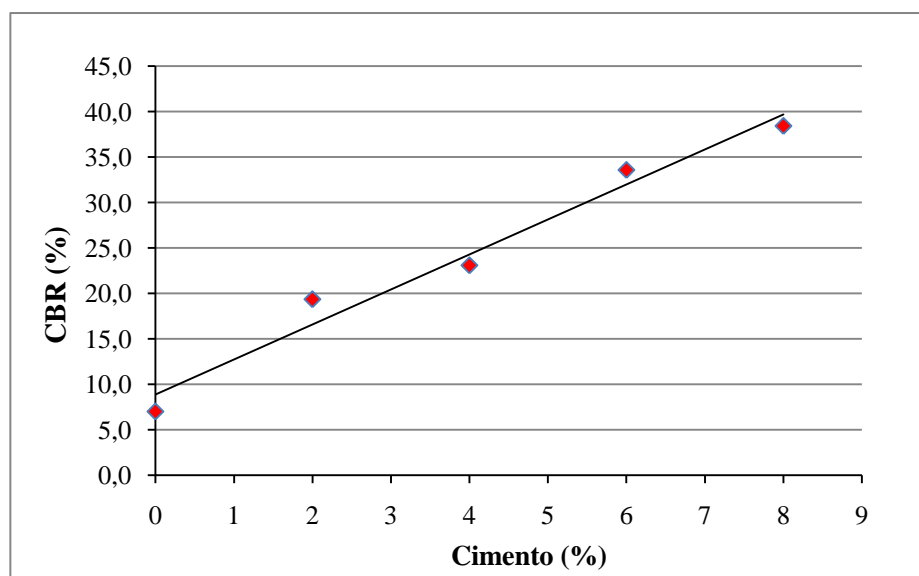


Figura 4.16 – Evolução dos valores de CBR em função do teor de cimento

#### 4.4.2. Ensaio à Compressão Simples e Diametral

Obtidos os valores de baridade máxima e teor de água ótimo para cada material, procedeu-se ao estudo da mistura destes com cimento, avaliando o seu comportamento mecânico e aplicabilidade em camadas de sub-base e base.

As misturas foram realizadas em betoneira, com o teor de água óptimo obtido no ensaio de compactação e com cimento do tipo CEM II 32,5 kN, tal como no ensaio CBR.

Estabeleceu-se que a quantidade de cimento a aplicar deveria variar 2% entre 2% e 8%, para um período de cura de 7 dias e 28 dias para cada percentagem e a realização de 3 provetes por cada corpo de prova.

Moldaram-se os provetes com recurso a um martelo vibrador (Figura 4.7), segundo a norma NLT 310/90, de forma a simular a compactação de um cilindro de rolo.



Figura 4.17 - Martelo vibrador usado na compactação dos provetes.

Utilizaram-se os moldes do Proctor Modificado, cujo diâmetro é de 152,4 mm e a altura de 177,8 mm. Após moldagem, os provetes (Figura 4.18) foram colocados em câmara húmida, pelos períodos de cura estabelecidos, com temperatura constante de 22,5 °C e 95 % de humidade.



Figura 4.18 – Aspecto dos provetes após compactação e cura



Os ensaios de compressão simples foram realizados segundo a norma NLT 305/90 e os ensaios à compressão diametral (tracção indirecta) segundo a norma NLT 304/89.

O AGEC foi ensaiado na prensa normalmente utilizada para o ensaio de provetes de betão de cimento, conforme ilustrado na Figura 4.19, pois pelo ensaio de CBR com 2% de cimento foi possível concluir que a prensa usada nos ensaios CBR não teria a capacidade suficiente para maiores percentagens de cimento. O material fresado com cimento (FC) foi ensaiado na prensa utilizada no ensaio CBR, conforme ilustrado na Figura 4.20, pelo facto de a anteriormente referida não ter a sensibilidade e rigor necessário para estes provetes, pois o equipamento é adequado para materiais de elevada rigidez (betão).



Figura 4.19 - Ensaio à compressão simples (esquerda) e ensaio à compressão diametral (direita) do AGEC



Figura 4.20 – Ensaio à compressão simples (esquerda) e ensaio à compressão diametral (direita) do FC



No Quadro 4.4 apresenta-se os valores da resistência à compressão simples e diametral para o AGEc e são representados graficamente nas Figuras 4.21 e 4.22, respectivamente.

Quadro 4.4 – Resultados da resistência à compressão simples e diametral do AGEc

Cimento (%)	Compressão Simples		Compressão Diametral	
	$\sigma_c$ (MPa)		$\sigma_t$ (MPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
2	1,30	1,65	0,05	0,09
4	2,60	3,30	0,32	0,39
6	4,75	6,00	0,60	0,95
8	6,30	7,10	0,71	1,13

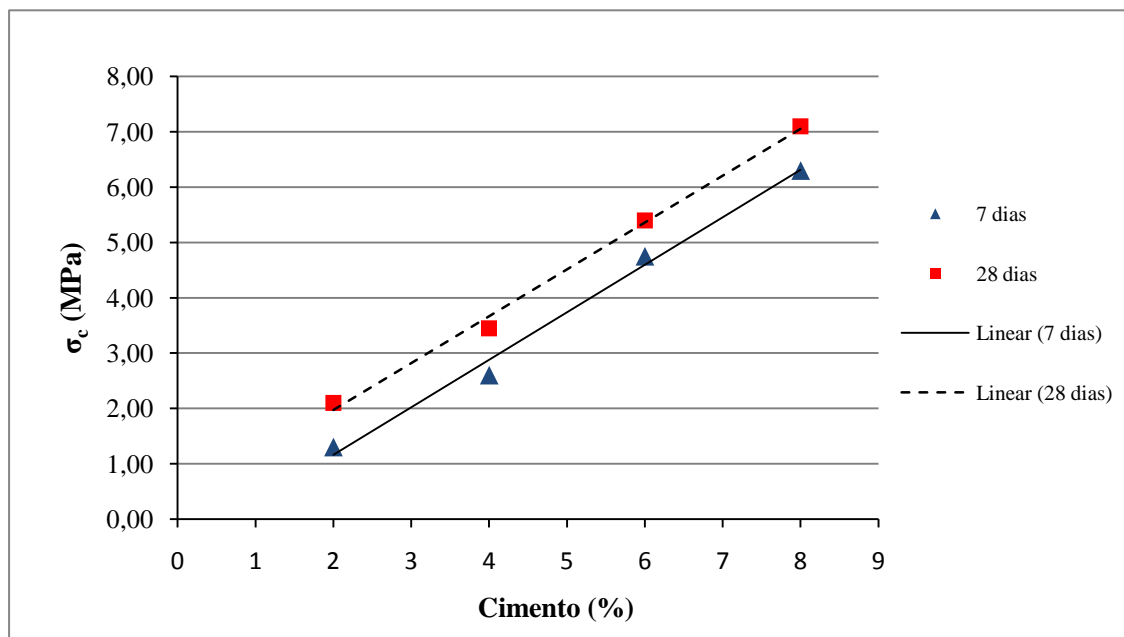


Figura 4.21 – Variação da resistência à compressão simples do AGEc com a variação do teor em cimento

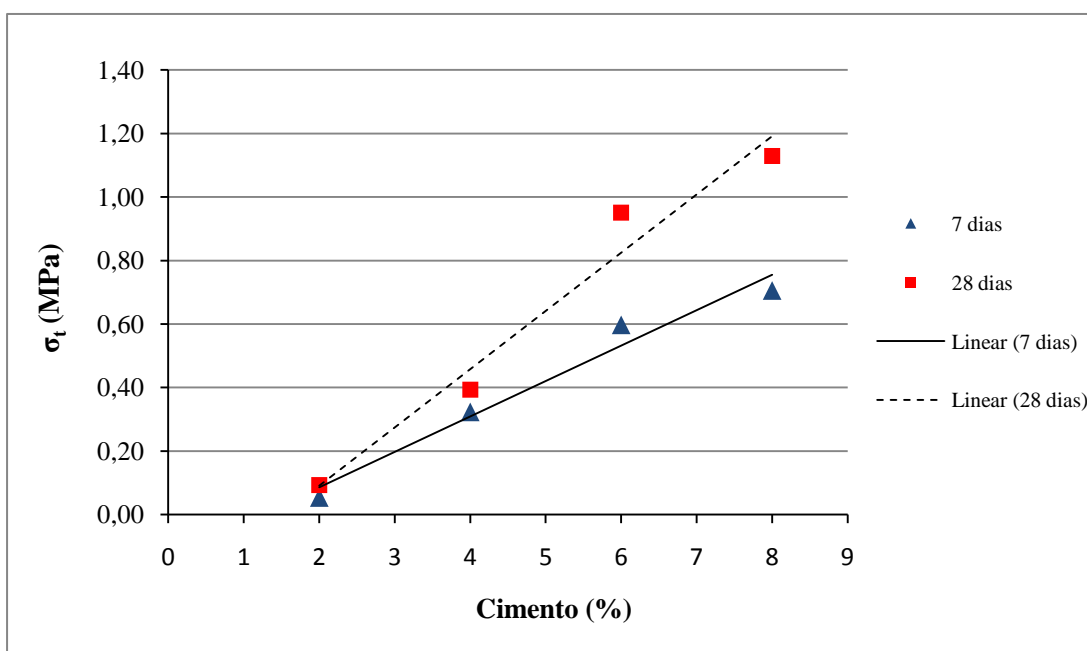


Figura 4.22 – Variação da resistência à compressão diametral do AGECE com a variação do teor em cimento

O MACOPAV define que, para um AGECE, a tensão de tracção indirecta mínima aos 28 dias de cura terá de ser superior a 1 MPa. Este valor é atingido aos 28 dias para 7% de cimento. Apesar de cumprir os requisitos, o teor necessário é elevado, não sendo economicamente favorável.

No Quadro 4.5 apresenta-se os valores da resistência à compressão simples e diametral para o FC e são representados graficamente nas Figuras 4.23 e 4.24, respectivamente.

Quadro 4.5 – Resultados à compressão simples e diametral do FC

Cimento (%)	Compressão Simples		Compressão Diametral	
	σ <sub>c</sub> (MPa)		σ <sub>t</sub> (MPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
2	0,13	0,23	0,01	0,03
4	0,32	0,53	0,04	0,08
6	0,53	0,92	0,08	0,14
8	0,86	0,99	0,12	0,16

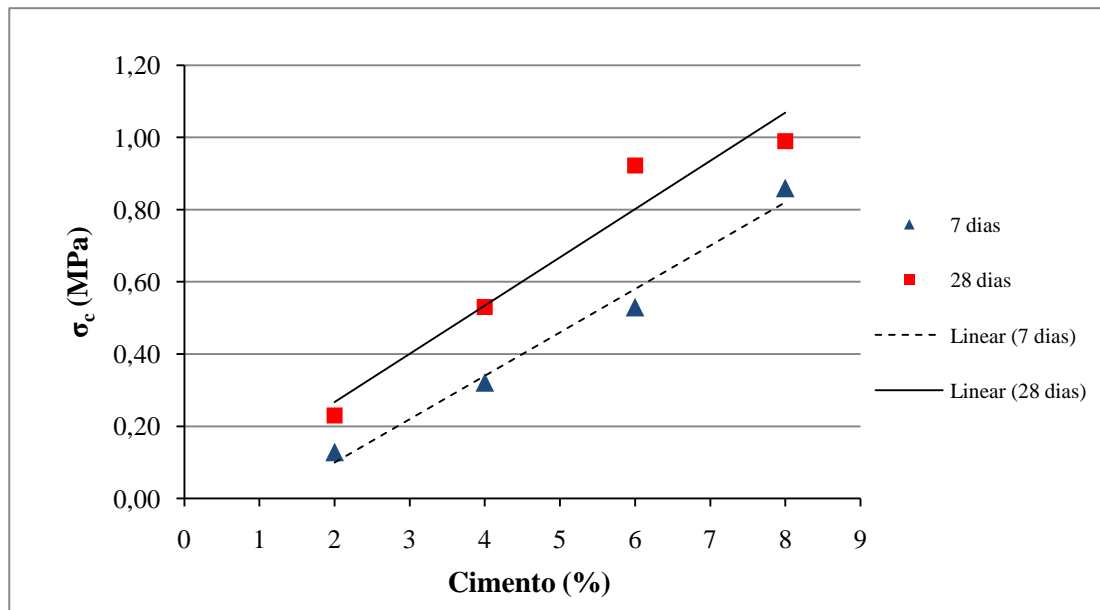


Figura 4.23 – Variação da resistência à compressão diametral do FC com a variação do teor em cimento

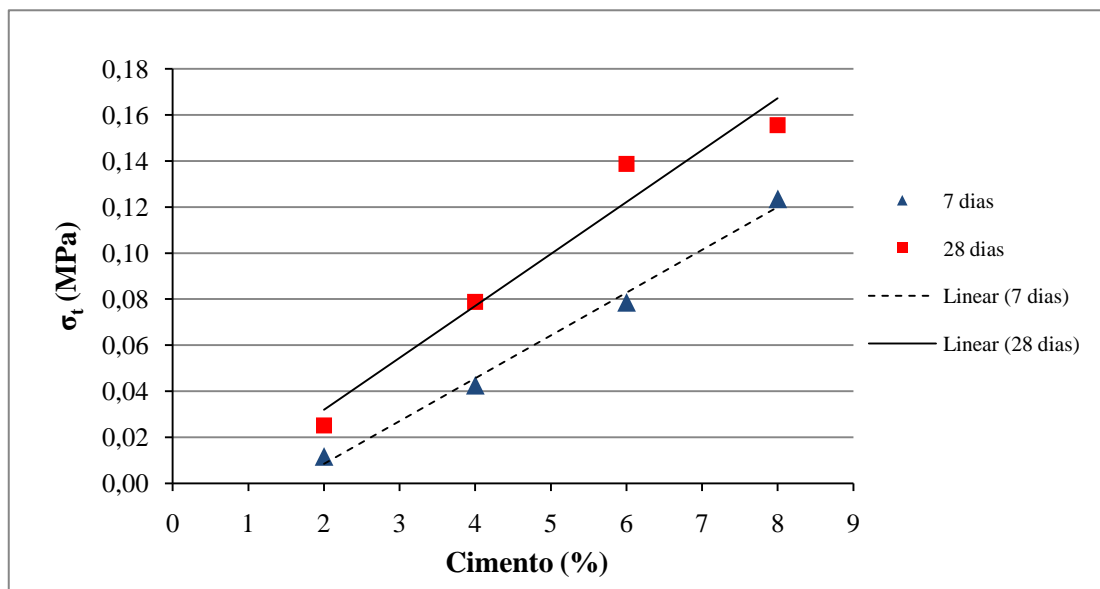


Figura 4.24 – Variação da resistência à compressão diametral do FC com a variação do teor em cimento

O CEEP define para FC uma resistência à compressão simples, aos 7 dias, superior a 2,5 MPa. Como o material não verifica estes requisitos e como também não é comparável com os valores de um AGECE, comparou-se com os valores definidos pelo MACOPAV, para um solo-cimento, em que a resistência à compressão diametral aos 28 dias deverá ser superior a 0,3 MPa. Verificando-se que o material não é adequado para aplicação em camadas de sub-base ou base.

Atendendo a que o FC compactado com o martelo vibratório (CMV), não atingiu os parâmetros mínimos para aplicação em camadas de sub-base ou base, e para averiguar da influência do método de compactação nos resultados, optou-se por realizar provetes, com as mesmas características e misturas utilizados anteriormente, mas com a compactação por apiloamento (CA), como no Proctor, a 100% de compactação relativa. Apenas se obtiveram valores de resistência para 7 dias de cura, pois não houve possibilidade de realizar provetes para 28 dias, mas os valores obtidos são bastante indicativos e conclusivos do seu comportamento.

O Quadro 4.6 apresenta os resultados da resistência à compressão simples e diametral para o AGECE.

Quadro 4.6 – Resultados da compressão simples e diametral para o AGECE aos 7 dias com compactação por apiloamento

Cimento (%)	Compressão Simples	Compressão Diametral
	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)
2	3,5	0,13
4	5,4	0,52
6	8,1	0,94

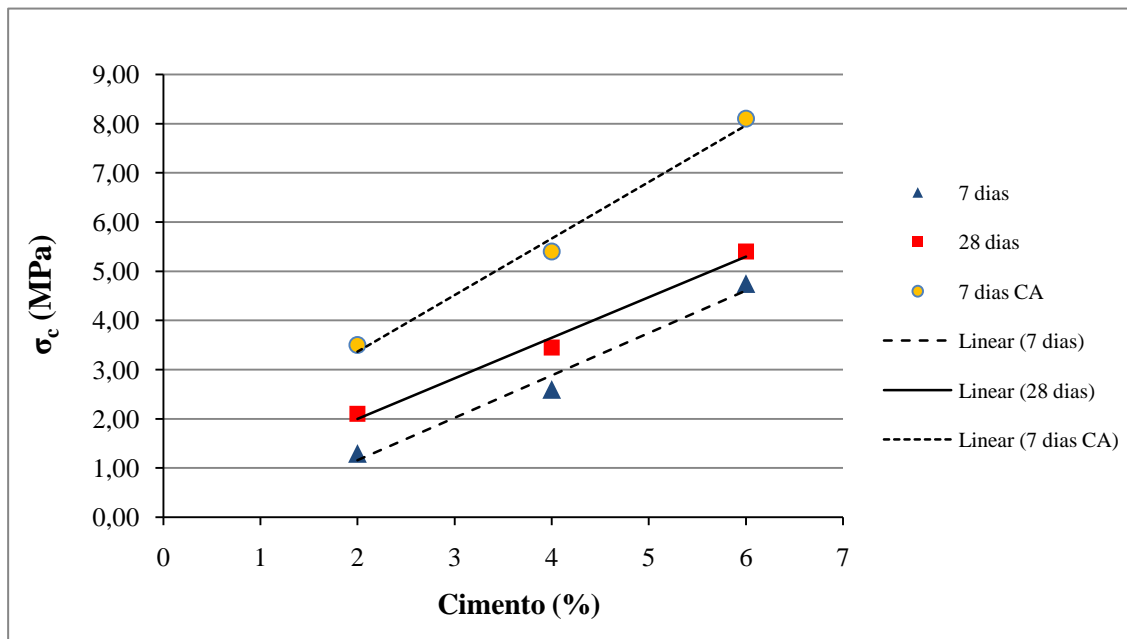


Figura 4.25 – Comparação dos resultados à compressão simples do AGEC com recurso à CA com os resultados já obtidos com recurso à CMV.

Como se pode verificar pela Figura 4.25, houve um grande incremento de resistência em relação aos resultados obtidos na primeira série de provetes aos 7 dias, atingindo valores superiores aos de 28 dias.

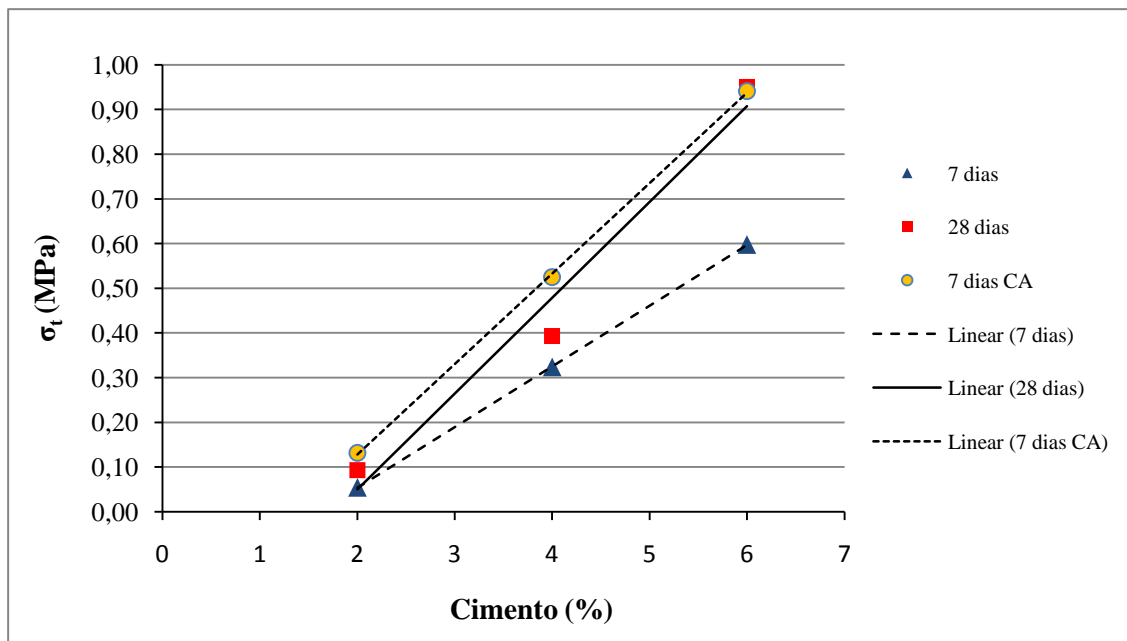


Figura 4.26 - Comparação dos resultados à compressão diametral do AGEC com recurso à CA com os resultados já obtidos com recurso à CMV.

Analizando o gráfico da Figura 4.26, tal como no ensaio de compressão simples, obteve-se valores superiores aos iniciais tanto aos de 7 dias como de 28 dias. Os valores de referência são para 28 dias de cura, mas como se obteve 0,94 MPa aos 7 dias e pela evolução natural do ganho de resistência, pode-se dizer que aos 28 dias, o AGECE estudado, verificará os requisitos mínimos, provavelmente para um teor em cimento inferior a 7% (valor para o qual se obteve 1 MPa aos 28 dias), no entanto não é possível defini-lo.

O Quadro 4.7 apresenta os resultados da resistência à compressão simples e diametral para o FC.

Quadro 4.7 - Resultados da compressão simples e diametral para o FC aos 7 dias (CA)

Cimento (%)	Compressão Simples	Compressão Diametral
	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)
2	0,40	0,03
4	0,67	0,08
6	1,18	0,12
8	1,40	0,20

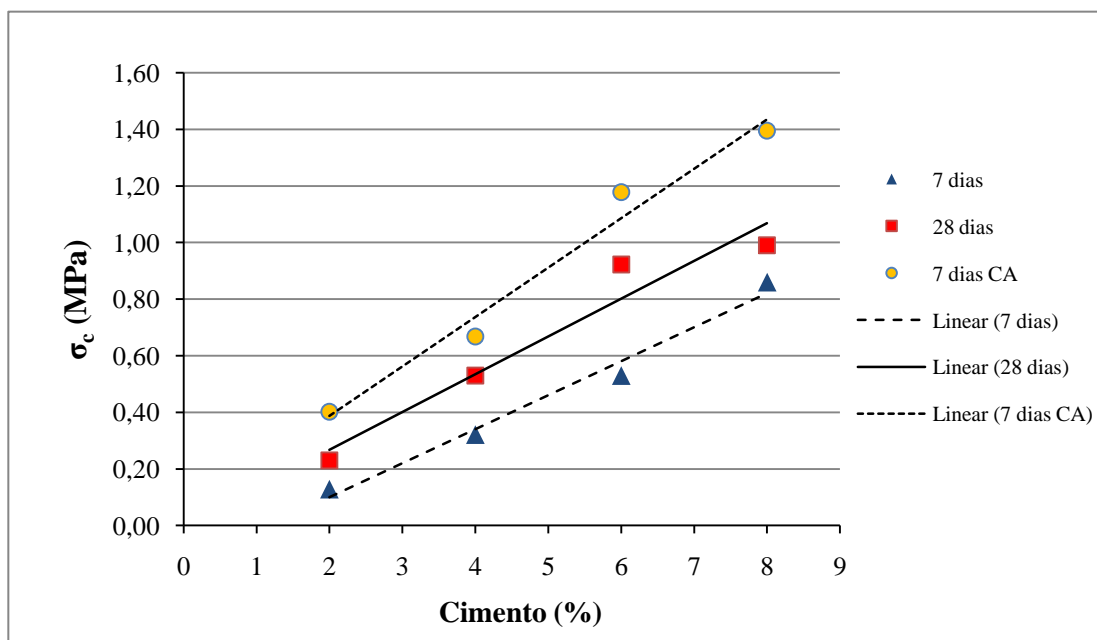


Figura 4.27 - Comparação dos resultados à compressão simples do FC com recurso à CA com os resultados já obtidos com recurso à CMV.

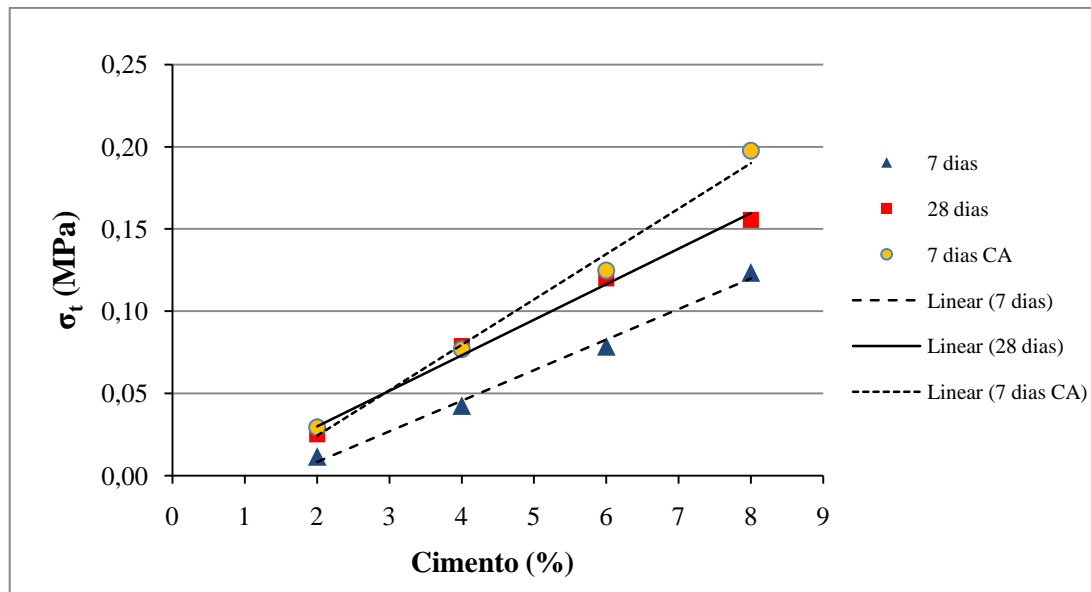


Figura 4.28 - Comparação dos resultados à compressão diametral do FC com recurso à CA com os resultados já obtidos com recurso à CMV.

Quanto ao FC, verifica-se uma melhoria significativa da resistência, mas mesmo assim não verifica os requisitos mínimos. O que leva a concluir que os baixos valores obtidos da primeira vez, não foram apenas consequência do tipo de compactação, mas também das características do material fresado. No entanto fica bem clara a forte dependência dos resultados do processo de compactação laboratorial usado, efectivamente, com a compactação por vibração o valor máximo de baridade obtida nunca atinge o máximo obtido na compactação por apiloamento.

#### 4.5. Análise e Discussão dos Resultados

Na caracterização física dos materiais obteve-se resultados satisfatórios, sendo possível prever o comportamento destes materiais. O ABGE cumpre os requisitos mínimos adoptados pelo CEEP, logo a sua aplicação em camadas de pavimento é viável. O material fresado, pela análise granulométrica e pela quantidade de finos presentes, conclui-se que terá um comportamento semelhante a uma areia extensa bem graduada (SW), logo requer o estudo do seu comportamento mecânico para concluir quanto à sua aplicabilidade nas camadas inferiores (granulares) de um pavimento.

Tanto no ensaio de equivalente de areia como no de azul-de-metileno, é clara a diferença entre os dois materiais, no que diz respeito à quantidade de finos (partículas  $\leq 0,075\text{mm}$ ). O AGE contém uma grande quantidade de finos, considerada normal para este material, enquanto, que o material fresado apresenta uma pequena percentagem de finos.

Os resultados do ensaio Proctor são valores normais para os materiais em estudo. O material fresado tem um teor de água ótimo superior ao ABGE para realizar a sua compactação, que se deve ao facto deste material apresentar uma massa volúmica menor, ou seja maior índice de vazios e como tal maior capacidade de retenção da água.

Em suma, pela caracterização dos materiais, conclui-se que o ABGE é conforme para a aplicação em camadas granulares de pavimentos e quanto ao material fresado, apenas se pôde tirar conclusões após o estudo do seu comportamento mecânico através dos ensaios de CBR, compressão simples e diametral, pois é pouco prudente definir comportamentos padrão para estes materiais, visto que o seu comportamento depende, para além da compactação obtida, de diversos factores, tais como:

- fresagem ou demolição e posterior britagem do material;
- percentagem de betume;
- quantidade de finos;
- tipo e qualidade do betume

A definição de um valor de CBR para o ABGE não é prática comum, pois não é um parâmetro usualmente utilizado no dimensionamento das camadas granulares, ao contrário dos solos, em que o módulo de deformabilidade depende do valor de CBR. Contudo, realizou-se o ensaio para fazer a analogia com o material fresado. Os valores de CBR obtidos para o material fresado, com e sem cimento, são baixos, principalmente quando sem cimento se obteve  $\text{CBR} = 7\%$ , que é um valor característico para solos da classe S2. Verifica-se um aumento significativo do índice de CBR do solo quando misturado com 2% de cimento. Quando se varia o teor em cimento, observa-se um aumento do valor de CBR de uma forma quase linear, conforme ilustrado na Figura 4.16. Analisando o valor de CBR do ABGE, verifica-se que o valor deste é bastante superior ao material fresado, mesmo quando misturado com 8% de cimento. Este comportamento era esperado, pois o ABGE funciona muito bem quando estabilizado mecanicamente sem qualquer tratamento, enquanto, que pela



caracterização do material fresado, esperava-se um comportamento equivalente a um solo arenoso.

Os ensaios à compressão simples e diametral vieram confirmar o comportamento verificado no ensaio CBR, pois o AGECE apresenta, em ambos os ensaios, valores de resistência muito superiores ao FC.

Os primeiros resultados obtidos para o AGECE (com compactação por vibração) cumprem os requisitos do MACOPAV e do CEEP para a sua aplicação em camadas de base, mas só para 7% de cimento, sendo uma solução anti-económica. O segundo método de compactação permitiu um grande incremento de resistência, o que demonstra a grande importância da compactação no desempenho dos materiais, no entanto, como já foi referido, não foi possível definir, para que teor de cimento os valores de referência são verificados, devido ao facto de não se ter realizado provetes aos 28 dias com a compactação do tipo Proctor, mesmo assim é possível prever que se obtenha 1,0 MPa para um teor em cimento aos 28 dias de cura inferior a 6%.

No caso do FC, este não verifica os requisitos definidos para solo-cimento, apesar de se aproximar bastante, com o inconveniente de ser necessário um elevado teor de cimento, que economicamente, torna-se inaplicável. Não sendo apropriado para incorporar numa camada de base, fez-se a análise da sua aplicabilidade em leito de pavimento, com base no MACOPAV, que classifica um solo-cimento para esta camada de ST2, que exige um valor de  $CBR > 15\%$  e  $R_{cd} (28 \text{ dias}) > 0,20 \text{ MPa}$ . Todas as misturas de FC cumprem os valores de CBR para aplicação nesta camada, enquanto, que para a resistência à compressão diametral não se definiu um teor de cimento, pelos mesmos motivos referidos para o AGECE. Portanto no Capítulo 5, realiza-se o dimensionamento de uma estrutura flexível convencional e outra com a incorporação de um ST2 no leito de pavimento, realizando o estudo da tensão de tracção instalada na base do leito para cada teor de cimento.

## 5. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Pretende-se estudar a aplicação do FC em leito de pavimento, visto este não cumprir os requisitos para a sua aplicação em camadas granulares, através do dimensionamento de uma estrutura eficaz comparando-a com uma estrutura de um pavimento flexível convencional quando submetidas a um carregamento correspondente a um tráfego médio, considerando uma classe de tráfego T3. Considerou-se uma estrada com uma via em cada sentido, localizada na zona centro e uma velocidade de projecto de 50 km/h.

Adoptou-se características das misturas betuminosas, das camadas granulares e da fundação, visto o objectivo principal ser o estudo do comportamento e contribuição do FC quando aplicado em leito de pavimento.

Admitiu-se um solo de fundação da classe F2, constituído por um solo S2 e um leito de pavimento S3 (30 cm), com o módulo de deformabilidade de  $E = 60 \text{ MPa}$  e o coeficiente de Poisson de  $\nu = 0,40$ , segundo o MACOPAV.

### 5.1. Estrutura de Pavimento Convencional

Com base no MACOPAV, realizou-se um pré-dimensionamento de uma estrutura flexível com duas camadas granulares, uma sub-base e uma base, ambas constituídas por um agregado de granulometria extensa (*tout-venant*), com 20 cm de espessura cada. Adoptando uma classe de tráfego T3 e uma classe de fundação F2, resulta uma espessura de 24 cm de camadas betuminosas, atribuindo 5 cm à camada de desgaste (BD) e 19 cm à camada de macadame betuminoso (MB).

O módulo de deformabilidade da sub-base ( $E_{sb}$ ) é calculado, em função do solo de fundação, pela expressão (2.2) e o da base ( $E_b$ ) é calculado pela mesma expressão, substituindo o módulo de deformabilidade da fundação pelo da sub-base, obtendo-se os seguintes valores:

$$E_{sb} = 0,2 \times 200^{0,45} \times 60 = 130 \text{ MPa}$$

$$E_b = 0,2 \times 200^{0,45} \times 130 = 282 \text{ MPa}$$

O coeficiente de Poisson considerado para as duas camadas é de  $\nu = 0,35$ , proposto pelo MACOPAV.

Como já foi referido adoptaram-se duas camadas betuminosas, uma de desgaste com betão betuminoso e outra em macadame betuminoso (fuso B). Ambos os betumes são do tipo 35/50, com as características apresentadas no Quadro 5.1. A temperatura de serviço ( $T_s$ ) adoptada corresponde à temperatura da zona de Coimbra, sendo o valor de cálculo de  $T_s=27,1$  °C. O Quadro 5.2 apresenta as características das misturas betuminosas.

Quadro 5.1 - Características do betume a utilizar nas camadas de misturas betuminosas

	Pen25 (0,1mm)	$T_{AB}$ (°C)
Betume 35/50	42	54

Quadro 5.2 - Características das misturas betuminosas a utilizar (agregados e betume)

	$\gamma_a$ (kN/ m <sup>3</sup> )	$\gamma_b$ (kN/ m <sup>3</sup> )	$T_b$ (%)	n(%)
Betão betuminoso de desgaste	26,2	10,4	5,50	4,50
Macadame betuminoso	25,7	10,4	4,50	6,00

O cálculo da rigidez do betume  $S_b$  (MPa) foi utilizada a equação (5.1) proposta por Ullidtz e Peattie (1980):

$$S_b = 1,157 \times 10^{-7} t^{-0.368} e^{IP} (T_{ab} - T)^5 \quad (5.1)$$

em que:

t - tempo de carregamento (s)

IP - índice de penetração do betume

$T_{ab}$  - temperatura de amolecimento do ensaio anel e bola (°C)

$T = T_s$  - temperatura de serviço (°C)

(A equação é válida para  $0,01 \leq t \leq 0,1$ s;  $-1 \leq IP \leq 1$ ;  $10 \leq (T_{ab} - T) \leq 60$ °C)

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas  $E_m$  (Pa), para valores da rigidez de betume  $S_b$  entre 5 e 1000 MPa é dado pela equação (5.2) proposta pela Shell:

$$E_m = 10^A \quad (5.2)$$

em que:

$$A = \frac{S_{89} + S_{68}}{2} \times (\log S_b - 8) + \frac{S_{89} + S_{68}}{2} \times |\log S_b - 8| + S_{m108} \quad (5.3)$$

em que,

$$S_{89} = 1,12 \times \frac{(S_{m3109} - S_{m108})}{\log 30} \quad (5.4)$$

$$S_{68} = 0,6 \times \log \left( \frac{1,37.V_b^2 - 1}{1,33.V_b - 1} \right) \quad (5.5)$$

$$S_{m3109} = 10,82 - \frac{1,342.(100 - V_a)}{V_a + V_b} \quad (5.6)$$

$$S_{m108} = 8 + 5,68 \times 10^{-3} \times V_a + 2,35 \times 10^{-4} \times V_a^2 \quad (5.7)$$

em que:

$V_a$  – cociente do volume de agregado pelo volume total (%)

$V_b$  - cociente do volume de betume pelo volume total (%)

Neste caso, os módulos de deformabilidade calculados pelo método da Shell têm os seguintes valores:

- Betão betuminoso de desgaste –  $E_{bd} = 3853$  MPa
- Macadame betuminoso –  $E_{mb} = 4426$  MPa

O coeficiente de Poisson adoptado é de  $\nu=0,35$ .

A Figura 5.1 representa a estrutura de pavimento flexível adoptada para o dimensionamento com os respectivos módulos de deformabilidade e coeficientes de Poisson para cada camada, apresentando também os pontos críticos que originam dano no pavimento.

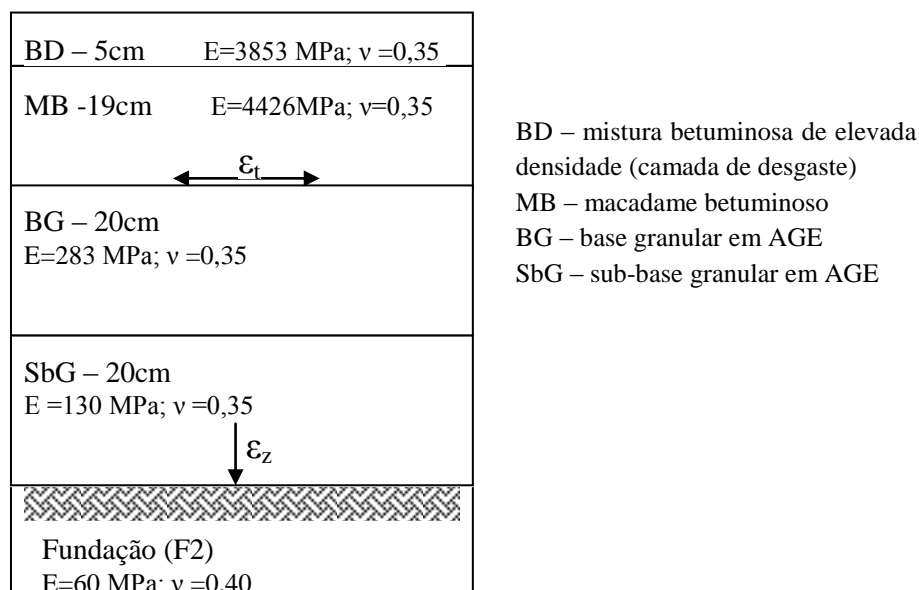


Figura 5.1 – Estrutura de pavimento flexível convencional obtida no pré-dimensionamento

Calculados os módulos de deformabilidade de cada camada, utilizou-se o programa de cálculo automático Bisar 3.0, que se rege por leis empírico-mecanicista, de modo a obter o estado de tensão e deformação nos locais onde estas são mais condicionantes, na base das camadas betuminosas, temos a extensão de tracção máxima que provoca dano por fadiga e no topo da camada de fundação, temos a extensão de compressão máxima onde ocorre dano por deformação permanente.

Assim sendo, através do método proposto pela Shell, é possível calcular o número de eixos padrão de 80kN admissível para a estrutura de pavimento, comparando de seguida este valor com o número de eixos padrão previsto para o período de vida do projecto.

Para o cálculo à fadiga adopta-se a equação (5.8):

$$\epsilon_{rt} = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E_m^{0,36} \times N_{adm}^{-0,2} \quad (5.8)$$

Calculando o factor F de ajustamento à fadiga, vem

$$N_{adm} = \left[ \frac{\frac{\epsilon_{rt}}{0,856 \times V_b + 1,08}}{E_m^{-0,36}} \right] \times F \times 10^{-6} \quad (5.9)$$

Para o cálculo à deformação permanente resulta:

$$\varepsilon_{zp} = 1,8 \times 10^{-2} \times N_{adm}^{-0,25} \Leftrightarrow N_{adm} = \left( \frac{\varepsilon_{zp}}{1,8 \times 10^{-2}} \right)^{\frac{-1}{0,25}} \quad (5.10)$$

O cálculo do dano é dado pela expressão (5.11)

$$D(\%) = \frac{N_p}{N_{adm}} \times 100 \quad (5.11)$$

Para  $D < 80\%$  a estrutura estará sobredimensionada e para  $D > 100\%$  estará subdimensionada.

Analisando os resultados obtidos para as extensões e para o dano, verificou-se que a estrutura estava sobredimensionada, pois obteve-se um dano de deformação permanente inferior a 80%. Assim realizaram-se várias tentativas de modelação da estrutura até obter valores aceitáveis de dano, entre 80% e 100%. Tal objectivo foi atingido reduzindo a espessura da camada de macadame betuminoso de 19cm para 16cm, mantendo as restantes, obtendo um dano de deformação permanente de 97% e à fadiga de 21%, obtendo a estrutura representada na Figura 5.2.

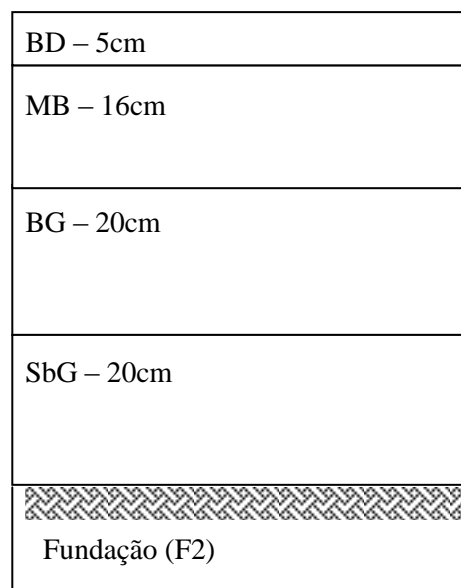


Figura 5.2 – Estrutura de pavimento flexível obtido no dimensionamento

## 5.2. Estrutura de Pavimento Utilizando FC em Leito de Pavimento

O material fresado sem tratamento, não é aplicável em leito de pavimento, pois obteve um índice de CBR = 7%, o que lhe confere uma classe de solo S2 e para uma fundação F2, o solo do leito de pavimento deve ser pelo menos um S3. Assim, passa-se à análise da aplicação de FC em leito de pavimento

A introdução de uma camada ligada aglutinada com ligante hidráulico em leito de pavimento modifica a análise estrutural do pavimento, dado que o critério de ruína se pode resumir geralmente ao controlo da tensão de tracção instalada na base da camada ligada.

O MACOPAV contempla a incorporação de solos aglutinados com ligantes hidráulicos (solo-cimento) em leito de pavimento, com a classificação ST2, em que o valor de CBR > 15% e  $R_{cd}$  (28 dias) > 0,20 MPa. Portanto, considerando o FC um solo tratado, estes limites serão adoptados para classificar este material.

Para todos os teores de cimento obtiveram-se valores de CBR superiores a 15%, contudo, não atingiram um resistência  $R_{cd}$  (28 dias) > 0,20 MPa. Assim, optou-se por estudar a contribuição do uso de um solo-cimento em leito de pavimento de classe ST2, independentemente dos valores obtidos. Segundo o MACOPAV, com um solo de fundação de classe S2 e um leito com 25 cm de ST2, obtém-se uma classe de fundação F3 com  $E = 100$  MPa, mantendo  $\nu=0,40$ .

Manteve-se a estrutura do pavimento obtido anteriormente (Figura 5.2), alterando apenas a classe de fundação, que consequentemente altera os módulos de deformabilidade das camadas granulares. O Quadro 5.3 apresenta as espessuras e os módulos de deformabilidade de cada camada do pavimento adoptado.

Quadro 5.3 – Espessuras e módulos de deformabilidade das camadas do pavimento

	<b>h (cm)</b>	<b>E (MPa)</b>
<b>Camada de desgaste</b>	5	3853
<b>Macadame Betuminoso</b>	16	4426
<b>Base em ABGE</b>	20	471
<b>Sub-base em ABGE</b>	20	217
<b>Fundação/LP</b>	$\infty$	100

Com recurso ao Bisar e após algumas tentativas, encontrou-se um pavimento que se adequa à nova fundação, pois a estrutura base estava sobredimensionada.

Para esta nova estrutura obteve-se um dano à fadiga de 28% e de deformação permanente de 93%, através da redução da camada de macadame betuminoso e da camada de base granular. Portanto verifica-se que esta aplicação consegue uma redução considerável de espessuras de algumas camadas, levando à economia de materiais, donde resultou a estrutura representada na Figura 5.3.

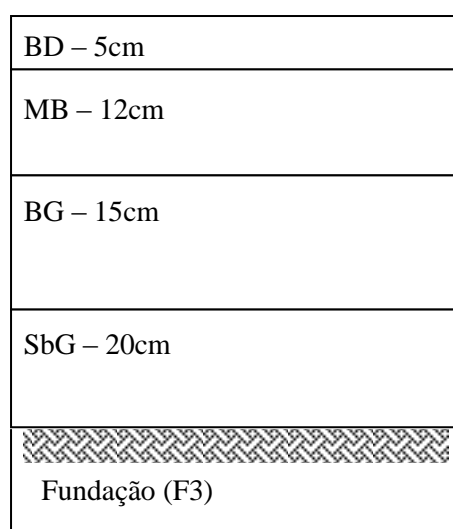


Figura 5.3 – Estrutura obtida do dimensionamento com incorporação de solo-cimento em leito de pavimento.

A estrutura obtida (Figura 5.3) servirá de base para o estudo individual de cada teor de cimento, analisando a estrutura com a separação da camada de leito de pavimento da fundação, de modo a estudar a aplicabilidade de FC e encontrar o teor de cimento adequado, recorrendo ao programa Bisar, deixando de parte os valores de referência definidos nos manuais (MACOPAV e CEEP) para os materiais isolados.

Procurando saber se o material é adequado ou não em função das extensões e tensões obtidas no pavimento no seu conjunto e dos valores de dano obtidos.

Portanto, realizou-se a análise de tensões e extensões mantendo as espessuras das camadas de pavimento e os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas. Tendo em conta os módulos de deformabilidade das camadas granulares, atribui-se para a camada base



E=420MPa e para a sub-base E=220 MPa. Fez-se variar o módulo de deformabilidade do leito de pavimento em função do índice de CBR obtido para cada mistura (Quadro 5.4). Considerou-se ainda a fundação da classe F2 com E=60 MPa.

Os critérios de ruína neste estudo são, para além da extensão de tracção na base das camadas betuminosas e da extensão vertical no topo de fundação, a tensão de tracção na base da camada de leito de pavimento e a extensão vertical no topo da mesma camada.

Apesar de não se tratar da aplicação de FC em bases, considerou-se a lei de fadiga da equação (5.11), proposta pelo MACOPAV para a tensão de tracção máxima na base das camadas tratadas com ligantes hidráulicos, não para o cálculo do dano, mas para o cálculo de uma tensão de tracção admissível ( $\sigma_{t,adm}$ ) para  $N_{adm} = 40 \times 10^6$ .

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_r} = 1 + a \times \log N_{adm} \quad (5.11)$$

em que:

$\sigma_t$  - valor máximo da tensão induzida pelo eixo padrão

Para o caso em estudo admite-se  $a = -0,08$

$$\sigma_r = R_f \approx 1,5 \times R_{cd} \quad (5.12)$$

Para o valor de  $R_{cd}$  não se considerou o valor característico para um solo-cimento  $R_{cd} = 0,30$  MPa, por não o ter atingido e como a análise é realizada independentemente desse facto, para cada teor de cimento considerou-se como valor de  $R_{cd}$  os valores apresentados no Quadro 5.4, obtidos do ensaio à compressão diametral.

Quadro 5.4 – Valores de E,  $R_{cd}$  e  $\sigma_{t,adm}$  das misturas FC

% Cimento	2	4	6	8
CBR p/ 95% CR	19,3	23,1	33,6	38,4
E (MPa)	193	231	336	384
$R_{cd}$ (MPa)	0,05	0,10	0,15	0,20
$\sigma_{t,adm}$ (MPa)	0,03	0,06	0,09	0,12

Com recurso ao Bisar, calcularam-se as extensões e a tensão de tracção nos pontos críticos, obtendo pelo método da Shell os valores de dano apresentados no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Danos e tensões de tracção calculadas no dimensionamento com FC

Teor em cimento (%)	2	4	6	8
<b>Dano à fadiga base da camada das misturas betuminosas</b>	25%	23%	21%	18%
<b>Dano à deformação permanente base da camada de AGE</b>	15%	9%	3%	2%
<b>Tensão de tracção (MPa) base da camada ligada com cimento</b>	0,017	0,020	0,029	0,032
<b>Dano à deformação permanente topo da fundação</b>	41%	38%	29%	26%

Verifica-se que, nestas condições e sem tentativas para encontrar um pavimento adequado, que as estruturas dos pavimentos, independentemente do teor de cimento utilizado no leito do pavimento, estão sobredimensionadas, pois todos os valores de dano são muito inferiores a 80%. Os valores da tensão de tracção são muito baixos e inferiores aos valores admissíveis (Quadro 5.4), logo neste caso, não é condicionante para a sobrevivência do pavimento. Posto isto, o passo seguinte foi, com o mesmo tipo de análise e alterando as espessuras das camadas, encontrar uma estrutura que se adeque às condições e características da fundação, para cada caso.

Como primeira tentativa, reduziu-se a camada de sub-base para 15 cm, mas mantendo o valor de E, e a espessura do leito de pavimento para 20cm. Obtendo os resultados apresentados no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 - Danos e tensões de tracção calculadas no novo dimensionamento com FC

Teor em cimento (%)	2	4	6	8
<b>Dano à fadiga base da camada das misturas betuminosas</b>	27%	26%	23%	22%
<b>Dano à deformação permanente base da camada de AGE</b>	24%	14%	4%	3%
<b>Tensão de tracção (MPa) base da camada ligada com cimento</b>	0,020	0,023	0,035	0,037
<b>Dano à deformação permanente topo da fundação</b>	87%	80%	63%	56%

Para a estrutura adoptada, verifica-se que a partir de 4% de cimento, a estrutura fica sobre-dimensionada, enquanto, que para 2% e 4% obtém-se um dano à deformação permanente superior ou igual a 80%. Não se efectuaram mais tentativas para 6% e 8%, pois a estrutura já se encontra bastante reduzida, e uma maior redução pode dar origem a um comportamento instável e desajustado e por outro lado, as percentagens de cimento em questão já não são economicamente viáveis. A Figura 5.4 ilustra a estrutura final para a aplicação de FC com 2% a 4% de cimento.


BD – 5cm
MB – 12cm
BG – 15cm
SbG – 15cm

LP – 20cm (FC)
Fundação (F2)

Figura 5.4 – Estrutura de pavimento final obtida no dimensionamento com FC

### 5.3. Análise Comparativa das Estruturas

Como se pode verificar pela Figura 5.5, a incorporação de um leito de pavimento melhorado, permite a redução das restantes camadas levando à economia de materiais, principalmente das misturas betuminosas que são o material com maior custo. Esta solução proporcionou a redução de 7 cm na estrutura do pavimento convencional.

Quando se realiza uma análise mais pormenorizada, verifica-se a possibilidade de reduzir a espessura da sub-base e do leito de pavimento, donde resulta redução de 5cm na espessura. Por outro lado é razoável considerar que a redução total na espessura do pavimento foi de

14 cm, pois a camada que se adiciona ao existente (camada de fresado) é uma camada de melhoramento da fundação.

Na análise conjunta da fundação com o leito, como prevê o MACOPAV, não seria possível analisar o comportamento da camada com FC, no que diz respeito à tensão de tracção, tão comum em misturas com ligantes hidráulicos.




BD – 5cm	BD – 5cm	BD – 5cm
MB – 16cm	MB – 12cm	MB – 12cm
BG – 20cm	BG – 15cm	BG – 15cm
SbG – 20cm	SbG – 20cm	SbG – 15cm
		
Fundação (F2)	Fundação (F3)	LP (FC) – 20cm
		Fundação (S2)

Figura 5.5 – Comparação das estruturas de pavimentos obtidos

## **6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS**

### **6.1. Conclusões**

As conclusões foram sendo retidas ao longo dos diferentes capítulos, principalmente, nos dois capítulos precedentes, no entanto, é fundamental reforçar algumas conclusões obtidas.

Os resultados obtidos em laboratório na caracterização do ABGE, foram satisfatórios, cumprindo com os parâmetros definidos pelo CEEP, logo a sua aplicação em camadas de pavimento é viável. No caso do material fresado, foi possível concluir que este teria um comportamento semelhante a uma areia extensa bem graduada (SW), não estando estes materiais contemplados no CEEP, adoptou-se os parâmetros definidos para os solos, contudo, apenas com o estudo do seu comportamento mecânico com e sem cimento foi possível concluir quanto à sua aplicabilidade nas camadas inferiores (granulares) de um pavimento.

Foram realizados ensaios mecânicos dos materiais misturados com cimento, dos quais se pôde concluir que, a compactação é um factor determinante no comportamento dos materiais, tal como a quantidade de finos presentes. No caso do material fresado existem outros factores para além dos anteriormente referidos, tal como a presença de betume, o teor de betume bem como o tipo e qualidade e o próprio processo de fresagem que tem influência na granulometria do material.

Quanto aos resultados obtidos para a resistência à compressão simples e diametral, conclui-se que o AGECE é aplicável, segundo os requisitos do MACOPAV, enquanto, que para o FC se obteve valores muito baixos, provavelmente pelo elevado teor em betume que condiciona a aglutinação do material com o cimento, não sendo aplicável em camadas de base, nem como um solo-cimento.

Assim procedeu-se à análise da sua aplicação em leito de pavimento, através do cálculo de deformações e tensões no pavimento, comparando a estrutura resultante com a estrutura padrão considerada.

A incorporação de um leito de pavimento melhorado em FC, permitiu a redução das restantes camadas, logo uma maior economia de materiais, principalmente das misturas betuminosas que são o material com maior custo.

Como este estudo está relacionado com a técnica de reciclagem a frio com cimento, é de sublinhar que a reciclagem apresenta as seguintes vantagens:

- A reciclagem é uma possível técnica para o tratamento de pavimentos com problemas de fendilhamento, irregularidades ou outro tipo de patologias.
- É uma solução económica, relativamente às soluções tradicionais de reforço do pavimento.
- Apresenta vantagens do ponto de vista ecológico e de protecção do meio ambiente, ao não ser necessário recorrer a vazadouros e à extracção de agregados novos, e no caso da reciclagem a frio não aplicar calor às misturas betuminosas do pavimento (consumo de energia e emissão de voláteis).

Considera-se também que devem ser melhorados os seguintes aspectos:

- Definição dos estudos e ensaios de formulação e de controlo das características dos materiais;
- Conhecimento do comportamento dos materiais reciclados e a sua evolução no tempo (características resistentes e previsões de durabilidade).

## **6.2. Perspectivas Futuras**

Em resumo, considera-se que a técnica de reciclagem é uma tecnologia muito interessante e com um futuro muito promissor, pelo que devem continuar as experiências e as investigações para melhorar as características dos materiais, dos equipamentos, e o tipo do controlo de execução das obras, de modo a assegurar a qualidade final exigida.

A reciclagem é assim, mais uma opção de reabilitação de pavimentos betuminosos degradados, que podem ser fresados e tratados com ligante hidráulico, com baixo custos de processamento. Não deve reciclar-se simplesmente porque é um cenário ecológico, mas sim, porque é tecnicamente adequado e dela derivam vantagens económicas, tanto para as

empresas como para as administrações. Devem também, encaminhar os materiais para as funções onde se revelam mais indicados, para isso os projectos devem ser acompanhados de estudos específicos sobre reutilização dos materiais

Visto a crescente aplicação de técnicas de reciclagem em Portugal, é fundamental a revisão e actualização dos documentos normativos, pelos quais se rege a Engenharia Rodoviária para o dimensionamento e execução de camadas.

Houve um primeiro avanço com a revisão do CEEP, que já contempla algumas técnicas de reciclagem, apesar de continuar de alguma forma a limitar o trabalho do projectista, pois o material reciclado é um tipo de material em que dificilmente se consegue obter um padrão e a melhor forma de estudar a aplicabilidade do material é através da análise de tensões e deformações do pavimento, com recurso a métodos empírico-mecanicistas e programas de elementos finitos, em que é quantificado o dano provocado na estrutura e não através da obtenção de valores de resistência à compressão e à tracção para o material/camada em separado, no entanto é fundamental a realização de ensaios mecânicos, por forma ao estudo das misturas ser o mais completo possível.

O estudo realizado neste trabalho assim o permite concluir, pois pelos manuais o FC não seria aplicável, mas com a análise de estruturas através do método da SHELL e o programa BISAR, foi possível encontrar uma solução para a aplicação do FC.

## BIBLIOGRAFIA

- Alves, T. (2007). *Metodologias de Ascultação de Pavimentos Rodoviários - Aplicação Prática do Radar de Prospecção e do Deflectómetro de Impacto*. Dissertação submetida ao Instituto Superior Técnico, para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Lisboa.
- Araújo, J., Mesquita, M., & Cabanas, C. (2008). *Pavimentação do IC12 entre Canas de Senhorim e o IP3*. V Congresso Rodoviário Português. Estoril.
- Azevedo, C., & Cardoso, M. (2003). Reciclagem a quente em central betuminosa. *II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários – Reciclagem de Pavimentos*, (pp. 149-179). FEUP, Porto.
- Baptista, A. (2006). *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central: contribuição para o seu estudo e aplicação*. Dissertação submetida à FCTU de Coimbra, para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Coimbra.
- Baptista, A., & Santos, L. P. ((s.d.)). *Estruturas de Pavimento Rodoviário Flexível*. Coimbra.
- Baptista, A., & Santos, L. P. (2008). *Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente*. V Congresso Rodoviário Português. Estoril.
- Batista, F. (2004). *Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos - Misturas betuminosas densas a frio*. Tese de Doutoramento, FEUP. Porto.
- Benta, A., Santos, L., & Macedo, J. (2008). *Reabilitação de um pavimento flexível: Observação do estado superficial, avaliação da capacidade estrutural e soluções de reforço*. Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Maputo.
- Branco, F., Pereira, P., & Picado Santos, L. (2005). *Pavimentos Rodoviários*. Coimbra: Edições Almedina.
- David, D. (2006). *Misturas Asfálticas Recicladas a Frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico . Porto Alegre, Brasil.
- Dueñas, A., Lucas, F., & Nunes, H. (2008). *Desenvolvimento Sustentável - Reciclagem a Quente e Reciclagem a Frio*. V Congresso Rodoviário Português. Estoril
- EAPA (European Asphalt Pavement Association). (1998). *Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas*. Breukelen.
- EP. (2009). *Caderno de Encargos: 01 - Terraplanagens; 03 - Pavimentação* .



- Eugénio, B. M. (2008). *Reforço de Pavimentos*. Relatório de projecto submetido à FEUP para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Vias de Comunicação . Porto.
- Fonseca, P. (s.d.). *Reciclagem de Pavimentos*. Obtido em 15 de Outubro de 2008, de <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>
- JAE. (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*. JAE (actual EP).
- Jofré, C. (2003). *Reciclado de firmes com cimento*. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviário - Reciclagem de Pavimentos, (pp. 41-76). FEUP, Porto.
- Luzia, R. (2006). *Camadas não ligadas em pavimentos rodoviários - estudo do comportamento*. Coimbra: Almedina.
- Minhoto, M. J. (2005). *Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis*. Tese apresentada à Universidade do Minho para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil . Guimarães.
- Moreira, J. P. (2005). *Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento*. Dissertação apresentada à Universidade do Minho para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Rodoviária . Guimarães.
- Oliveira, E. (2003). *Estado actual da reciclagem de pavimentos e perspectivas futuras*. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviário - Reciclagem de Pavimentos, (pp. 3-6). FEUP, Porto.
- Pereira, P., & Santos, L. P. (2006). *Technical-Economical evaluation of Pavement Recycling Alternatives - 3º Gulf Conference on Roads*. Muscat, Oman.
- Pereira, P., Pais, J., Freitas, E., Silva, H., & Oliveira, J. (2007). *A reabilitação da rede rodoviária no século XXI - A contribuição da inovação para uma visão global da reabilitação rodoviária.*, (pp. 19-36). Universidade do Minho, Guimarães.
- Ribeiro, J. (2003). *Reciclagem a quente com espuma betume*. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviário - Reciclagem de Pavimentos, (pp. 79 - 94) . FEUP, Porto.
- Sánchez, J., Cardoso, A., & Vieira, L. (2008). *Reciclagem semi-quente em central. EN 244 - entre Ponte de Sôr e o entroncamento com a EN 118 (Gavião)*. V Congresso Rodoviário Português. Estoril.
- Seixas, P. (2008). *Reciclagem de pavimentos com espuma de betume - Uma experiência a grande altitude - Cordilheira dos Andes, Peru*. V Congresso Rodoviário Português. Estoril.
- Silva, C., & Jr., J. (n.d.). *Reciclagem de Camada Betuminosa como Sub-Base Estabilizada com Cimento na BR 381: Uma Experiência*.

- Simões, R., & Paul, I. (2003). *Aplicação da técnica de reciclagem de pavimentos in situ com cimento, na beneficiação da EN 383 - Canhestros/Aljustrel*. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários – Reciclagem de Pavimentos, (pp. 205 - 222) FEUP, Porto.
- Soto, J., Cardoso, A., & Vieira, L. (2008). *Reciclagem semi-quente em central. EN 244 - entre Ponte de Sôr e o entroncamento com a EN 118 (Gavião)*. V Congresso Rodoviário Português. Estoril.
- Teixeira, A., Rodrigues, R., & Azevedo, C. (2003). *Betume espuma - 1ª experiência em Portugal*. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos, (pp. 225 - 240). FEUP, Porto.
- Vieira, L. (2003). *Pavimentação - Reciclagem "semi-quente" em central*. II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários – Reciclagem de Pavimentos, (pp. 183 - 202). FEUP, Porto.
- Wirtgen. (2008). *Manual de Reciclagem a Frio* (2ª ed.).
- Wirtgen. (2003). *Material and Process Procedure Principles for the Hot Recycling*. Windhagen, Alemanha.
- Wirtgen. (2006). *Efficient Hot Recycling - an accepted method around the globe. The World of Wirtgen Hot Recyclers*. Windhagen, Alemanha.
- [www.wirtgen.com](http://www.wirtgen.com). (s.d.).